PALEONTOLOGÍA
¿Qué acabó con los dinosaurios?

SOSTENIBILIDAD
Depuración natural de aguas residuales

ASTRONOMÍA
La guerra por el mayor telescopio





Febrero 2016 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

EL GEN DE LA OBESIDAD

Una mutación que ayudó a nuestros ancestros a superar hambrunas podría estar tras la pandemia actual

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL GEN DE LA OBESIDAD | IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO | LA EXTINCIÓN DE LOS DINOSAURIOS

N.° 473

FEBRERO 2016



6,90 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2016, Número 473

ISTOCKPHOTO/SARAYUTWATCHASIT



8



15



86

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Tras la epidemia actual de obesidad tal vez se halle un gen mutado que hemos heredado de nuestros antepasados simios y que favorece la conversión del azúcar de la fruta (fructosa) en grasa, la cual se acumula en nuestro organismo. Mientras que esta mutación ayudaría a nuestros ancestros a superar los tiempos de escasez, hoy, que la comida abunda, nos predispone a ganar unos kilos de más. Ilustración de Tim Bower



redaccion@investigacionyciencia.es



Julio y agosto 2015

EXPERIMENTACIÓN CON ANIMALES

Del artículo «Un sufrimiento innecesario», de Barbara King [Investigación y Ciencia, julio de 2015], puede extraerse una paradoja que todo investigador deberá pasar por alto si desea aferrarse a la ilusión de que los experimentos con crías de mono son éticos. Las pruebas que se llevan a cabo en tales ensayos persiguen entender el comportamiento de los seres humanos que crecen en condiciones de estrés. Para defender que los resultados puedan tener algún valor, es por tanto necesario admitir que el cerebro y la personalidad de humanos y primates comparten características de desarrollo similares. Pero, si un mono se parece lo suficiente a un humano como para ser un modelo experimental útil, ¿cómo calificar tales ensayos, si no es de crueles y poco éticos?

Bill Tarver
Wokingham, Inglaterra

COMUNICACIÓN CELULAR

A mi hija y a mí nos ha fascinado aprender sobre la existencia de las uniones intercelulares, las estructuras que conectan las células entre sí descritas por Dale W. Laird, Paul D. Lampe y Ross G. Johnson en el artículo «Dinámica y función de las uniones intercelulares» [Investigación y Ciencia, julio de 2015]. ¿Se comunican también las células del torrente sanguíneo a través de dichas uniones? ¿Y qué ocurre con los organismos unicelulares, especialmente con aquellos que forman colonias?

James Wurzer
Mary-Elizabeth Wurzer
Comas, Washington

Responden los autores: *Las células sanguíneas establecen uniones intercelulares durante su proceso de desarrollo en la médula ósea, en el que se comunican con sus vecinas mediante el intercambio de pequeñas moléculas. Durante largo tiempo pensamos que eso no ocurriría con las células maduras del torrente sanguíneo, ya que, si formasen uniones intercelulares, podrían aglomerarse y obstruir las vías circulatorias. Sin embargo, hoy sabemos que los linfocitos «activados» para combatir una infección bacteriana sí establecen uniones intercelulares. Ello podría constituir un paso previo al proceso por el que las células sanguíneas abandonan los vasos para combatir infecciones.*

En cuanto a los organismos unicelulares, tanto las células individuales como aquellas que forman colonias, como Volvox*, se comunican principalmente mediante señales químicas. Las uniones intercelulares se hicieron necesarias cuando las células que vivían junto a otras comenzaron a desarrollar funciones diferenciadas. Así ocurre, por ejemplo, en los celentéreos del género* Hydra*. Las células vegetales carecen de uniones intercelulares, pero establecen conexiones mutuas en las que intercambian moléculas y complejos mucho mayores.*

LUZ ETERNA

En «Toda la luz del universo» [Investigación y Ciencia, agosto de 2015], Alberto Domínguez, Joel R. Primack y Trudy E. Bell hablan sobre cómo medir la luz de fondo extragaláctica, la cual se forma por acumulación de la radiación emitida por todas las galaxias del universo a lo largo de toda la historia cósmica.

¿Cómo puede esa radiación de fondo seguir existiendo hoy? Si, excepto cuando atraviesa una lente gravitacional, la luz viaja en línea recta, ¿no debería haber desaparecido hace tiempo?

David Maranz

Al explicar por qué el cielo nocturno es negro, los autores no mencionan un modelo relativista que permite explicar el efecto. Conforme a dicho modelo, la intensidad de la luz de emitida por un objeto en movimiento disminuye en mayor medida cuanto más rápido se aleja la fuente del observador. Según la mecánica cuántica, la intensidad de la luz es proporcional a la frecuencia de la radiación y a la densidad de fotones, la cual, por tanto, también decrece con la velocidad de la fuente.

Philipp Konreich
Universidad de Siracusa

Responden los autores: *Las galaxias emiten luz durante miles de millones de años, y la mayor parte de dicha luz nunca ha sido absorbida debido lo vacío que se encuentra el espacio intergaláctico. Por tanto, la radiación continúa acumulándose y nosotros seguimos recibiéndola. Esa luz procede de galaxias situadas a diferentes distancias; cuanto más lejos se están, más tiempo ha estado viajando la luz hacia nosotros y antes fue emitida.*

En cuanto a la segunda pregunta, y como explicábamos en nuestro artículo, la longitud de onda de la luz se expande de manera proporcional a como lo hace el universo, lo que provoca que la intensidad de la luz procedente de fuentes distantes decrezca. El hecho de que tales fuentes se estén alejando de nosotros y que su «reloj» esté avanzando cada vez más despacio también provoca que la intensidad de la luz disminuya. Todos estos efectos relativistas se incluyen siempre a la hora de calcular la cantidad de radiación procedente de galaxias distantes.

Errata corrige

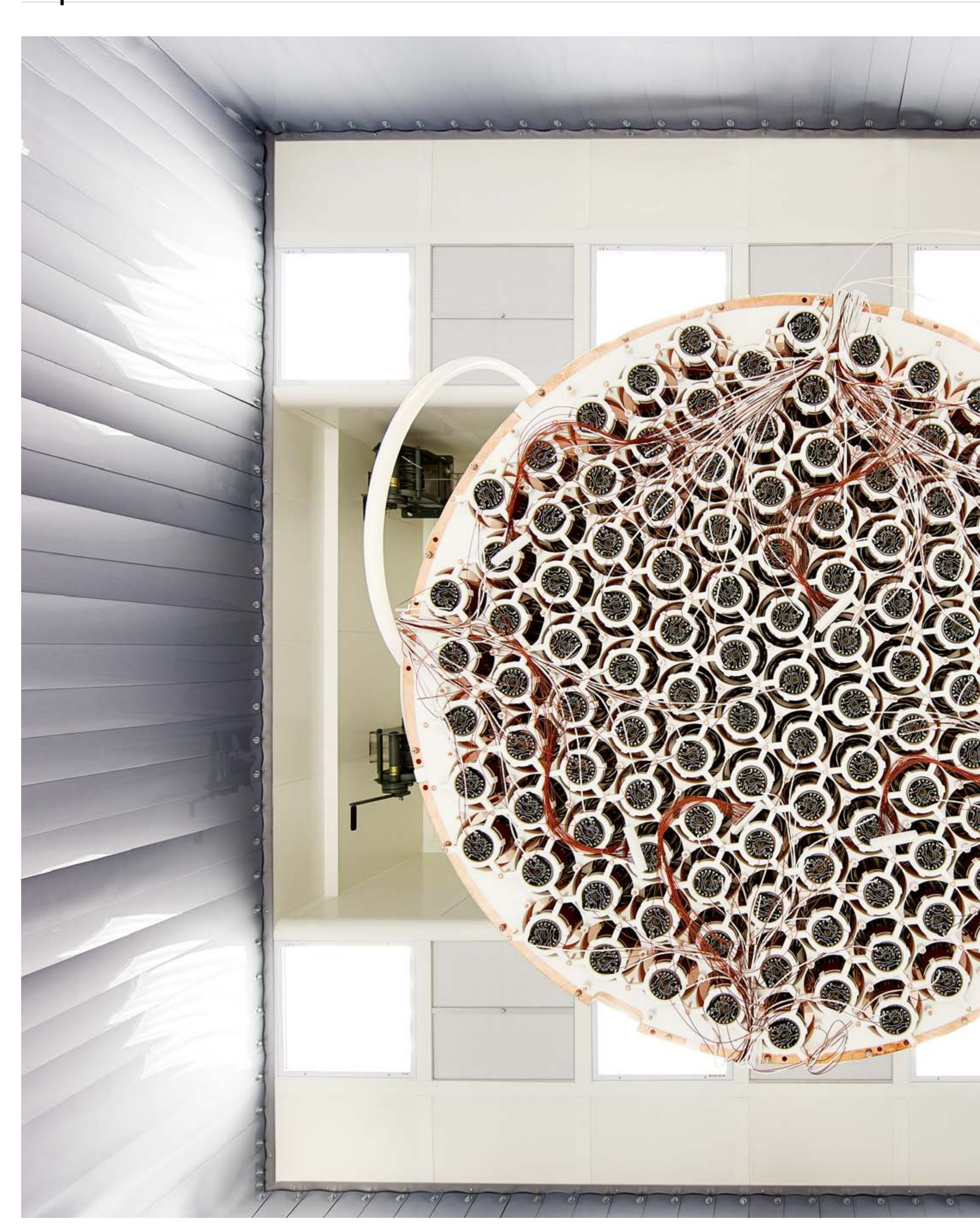
En la nota introductoria **100 años de relatividad general** [Investigación y Ciencia, noviembre de 2015], la referencia a la expedición de Eddington omite la predicción newtoniana sobre la curvatura de los rayos de luz. Por tanto, la segunda frase de la página 15 debería decir: «Tal y como Einstein había predicho, la luz de las estrellas se desviaba al pasar cerca del Sol el doble de lo vaticinado por la teoría de Newton».

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.





ENRICO SACCHETTI

FÍSICA

XENON1T: Ver en la oscuridad

Un nuevo experimento intentará encontrar materia oscura donde otros fracasaron

Puede que se trate de la última oportunidad para la hipótesis más popular entre los físicos a la hora de explicar la materia oscura, la misteriosa sustancia invisible que impregna el universo. En marzo, la instalación experimental XENON1T, situada en los Laboratorios Nacionales del Gran Sasso, en Italia, emprenderá la búsqueda más sensible hasta la fecha de WIMP, o «partículas masivas que interaccionan débilmente», el tipo de constituyente que muchos expertos creen responsable de la composición de la materia oscura.

El nuevo experimento será el último de una serie de detectores (el primero se remonta a los años ochenta) que, hasta ahora, han acabado con las manos vacías. Si XENON1T no da con estas huidizas partículas en pocos años, los investigadores podrían verse obligados a buscar explicaciones más exóticas. «Los mejores modelos [de WIMP] están al alcance de XENON1T», asegura Rafael Lang, físico de la Universidad Purdue que trabaja en el experimento. «Si no las encontramos, significará que nuestras ideas estaban completamente equivocadas y no nos quedará más remedio que empezar de cero.»

Las WIMP aparecen de manera natural en las teorías supersimétricas, una extensión del modelo estándar que propone que, por cada tipo de partícula elemental conocida, debería existir una compañera aún por descubrir. Las WIMP serían las más ligeras de tales partículas. Los físicos se inclinan por ellas porque, de forma natural, la teoría predice una abundancia de WIMP que concuerda con la cantidad de materia oscura que se sabe que existe en el universo. Esta puede deducirse a partir de sus efectos gravitatorios sobre las estrellas y las galaxias (se calcula que la materia oscura da cuenta del 85 por ciento de toda la materia existente en

LOS FOTOMULTIPLICADORES de la instalación XENON1T han sido diseñados para observar los destellos de luz que deberían provocar las partículas de materia oscura al chocar contra los átomos de xenón, la sustancia detectora del experimento.



DOS TÉCNICOS trabajan en la Cámara de Proyección Temporal, la cual contiene xenón y se encuentra circundada con cobre para someterla a un campo magnético uniforme.

el cosmos). Ninguno de los experimentos diseñados hasta ahora ha detectado WIMP, pero los investigadores aún no han perdido la esperanza de que aparezcan.

Situado en una cueva a 1400 metros de profundidad, XENON1T alberga una gran vasija cilíndrica con 3,5 toneladas de xenón líquido, una sustancia que desprende luz cuando se perturban sus átomos. El experimento intentará registrar las raras ocasiones en que una partícula de materia oscura colisione con un núcleo de xenón, lo que debería generar una señal característica. Aunque se cree que la materia oscura es ubicua (se estima que, en un segundo, unas 100.000 partículas atraviesan cada centímetro cuadrado de espacio), casi nunca interacciona con la materia ordinaria; los únicos efectos observados hasta ahora son los debidos a su atracción gravitatoria. Tras los dos años de búsqueda previstos en XENON1T, bastaría la observación de unos diez eventos con las propiedades esperadas para proclamar un descubrimiento.

Con un presupuesto de unos 14 millones de euros y con la colaboración de diez países, XENON1T sigue los pasos su antecesor, el experimento XENON100, 25 veces más pequeño. Gracias a un volumen de detección mucho mayor y a un blindaje más robusto, que obstruye el paso de otras partículas que podrían simular los efectos de la materia oscura, se espera que XENON1T sobrepase la sensibilidad de su predecesor en tan solo dos días de funcionamiento. También debería superar la capacidad del principal instrumento de características similares actualmente en funcionamiento, el experimento LUX, en Dakota del Sur, el cual trabaja con 370 kilogramos de xenón [*véase* «El estado actual de la búsqueda de materia oscura», por Alejandro Ibarra; Investigación y Ciencia, junio de 2014]. «No me sorprendería que XENON1T lograse un descubrimiento que haya escapado por poco a sus predecesores», opina Tim Tait, físico teórico de la Universidad de California en Irvine que no participa en ninguno de ellos.

Mientras tanto, las WIMP también podrían aparecer en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde se hacen chocar haces de protones a velocidades próximas a la de la luz con el fin de generar nuevas partículas. El acelerador comenzó el año pasado su segunda fase de operaciones, caracterizada por una energía total que casi dobla a la de la primera, iniciada en 2009.

Si dentro de pocos años ningún experimento atisba indicios de WIMP, tal vez los físicos habrán de alumbrar nuevas ideas para explicar la materia oscura. «Por una parte nos consta que existe, pero por otra sabemos muy poco de ella, así que es fácil teorizar sobre las diferentes posibilidades», apunta Tait. «Si no la vemos, significará que se trata de algo más extraño y maravilloso de lo que habíamos supuesto en un principio.»

—*Clara Moskowitz*

SALUD

Diagnosticar a partir del lenguaje

Las alteraciones del habla que causan ciertas enfermedades podrían usarse como indicadores

En el futuro, el médico tal vez nos pedirá que digamos algo más que «treinta y tres». Varios equipos de neurocientíficos, psiquiatras e informáticos están investigando hasta qué punto el uso del lenguaje por parte del paciente puede aportar pistas para el diagnóstico, antes de efectuar una sola prueba de laboratorio. La creciente potencia de cómputo y los nuevos métodos para medir la relación entre el comportamiento y la actividad del cerebro han dado pie a tales iniciativas. A pesar de que las pruebas basadas en la palabra hablada podrían no ser tan precisas como la secuenciación genética o las imágenes de resonancia magnética (RM), el análisis de un enorme volumen de datos lingüísticos podría resultar de utilidad en las enfermedades que carecen de claros indicadores biológicos.

—*Anne Pycha*

PSICOSIS

Psiquiatras de la Universidad de Columbia entrevistaron a 34 adultos jóvenes con riesgo de psicosis, un signo frecuente de la esquizofrenia que incluye delirios y alucinaciones. Dos años y medio después, cinco terminaron padeciendo psicosis y los demás no. Un algoritmo especialmente diseñado escrutó colectivamente las entrevistas iniciales con el propósito de descubrir rasgos lingüísticos que distinguieran un grupo de otro y halló que la psicosis aparecía relacionada con frases más breves, pérdida de congruencia entre el significado de una frase con la siguiente y menor utilización de las palabras «ese/esa», «qué» y «cuál». Cuando se ensayó más tarde en una entrevista con cada participante, el programa predijo con pleno acierto quién acabaría sufriendo psicosis. Los resultados acaban de ser publicados en *Schizophrenia* y en estos momentos se lleva a cabo una segunda tanda de pruebas con otro grupo de individuos en riesgo.

ENFERMEDAD DE PARKINSON

Veintisiete participantes en un estudio de la argentina Universidad Favaloro escucharon frases con verbos relacionados con posturas concretas de la mano (como aplaudir o propinar puñetazos). Tan pronto como entendían la frase, pulsaban un botón al tiempo que mantenían las ma-

ENRICO SACCHETTI



nos abiertas o cerradas en puño. Las personas sanas respondieron más rápidamente cuando el verbo y la postura de la mano eran concordantes (plana en el caso de aplaudir o con los dedos cerrados si se hablaba de golpear) con respecto a cuando no lo eran. En cambio, los afectados por los primeros estadios del párkinson no mostraron diferencias en el tiempo de reacción. Esas desconexiones podrían servir como indicadores precoces de la enfermedad que precederían a los problemas graves. En estos momentos se está efectuando un estudio similar con personas sanas pero portadoras de una mutación vinculada con el párkinson.

ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA (ELA)

La ELA es un trastorno neuromuscular que puede acabar deteriorando la facultad del habla a causa de la debilidad muscular. Un nuevo estudio dirigido por Sharon Ash, de la Universidad de Pensilvania, demuestra que la enfermedad también podría alterar el correcto uso de la gramática. Se pidió a 45 personas que narraran de viva voz los acontecimientos plasmados en una secuencia de 24 fotografías. Los pacientes con ELA dejaron más frases incompletas («Y está enojado porque...»), omitieron más determinantes («Búho voló alrededor») y cometieron más errores en el tiempo verbal («Y el ciervo lo empujará al precipicio»), con respecto a los controles sanos. Las imágenes de RM mostraron que las personas que incurrían en más errores gramaticales presentaban un deterioro más acusado de las regiones del cerebro donde reside el lenguaje. Todo apunta a que el análisis gramatical podría ser un modo relativamente simple de valorar la aparición y la gravedad de la enfermedad. En un estudio de seguimiento en curso, Ash y sus colaboradores están analizando narraciones más breves de los pacientes a los que se muestra una fotografía.

THOMAS FUCHS (*ilustración*); FUENTE: «ON THE MATERIALS BASIS OF MODERN SOCIETY», T. E. GRAEDEL ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 112, N.º 20:19 DE MAYO DE 2015; DAISY CHUNG (*tabla periódica*)

MATERIALES

Escasez elemental

La mayoría de los metales de los que depende la tecnología moderna carecen de sustitutos

Hace medio siglo bastaban un puñado de materiales (la madera, el hierro o la arcilla, por citar algunos) para fabricar los productos de uso común, fuesen industriales o de consumo. Hoy, un solo chip de ordenador contiene más de 60 elementos químicos, del tungsteno al iterbio. La dependencia de tal variedad de recursos ha suscitado el interés de Thomas Graebel, científico ambiental de Yale. A la vista de la creciente demanda de algunos elementos, ¿habrá con qué reemplazarlos si escasean?

En la mayor parte de los casos, la respuesta es negativa. Tras un estudio exhaustivo de las propiedades de varios elementos, sus ciclos de vida y sus aplicaciones, Graedel y sus colaboradores hallaron que no existen sustitutos eficientes para todos los usos de ninguno de los 62 metales o metaloides analizados. Y, en lo referente a los usos principales, una docena de metales carece de alternativa o estas resultan inadecuadas, en el sentido de que implicarían un peor rendimiento. Los resultados aparecieron publicados hace unos meses en la revista *PNAS*.

Para Graedel, sin embargo, puede que haya algo bueno en las escaseces coyunturales: deberían empujar a los ingenieros a diseñar materiales completamente nuevos y transformadores.

—Jennifer Hackett

Tabla periódica de la escasez de los metales

LITIO (Li)
Aunque muy demandado, el litio cuenta con buenos suplentes para la mayoría de sus aplicaciones. Por ejemplo, las baterías basadas en este elemento podrían reemplazarse por otras de zinc o por alternativas híbridas de níquel y otro metal sin grandes pérdidas en el rendimiento.

COBRE (Cu)
Aunque puede reemplazarse por aluminio, el rendimiento de este último deja que desear en las aplicaciones más comunes del cobre: el cable industrial y los componentes electrónicos, como los transistores.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	†	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo

* Lantánidos	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
†Actínidos	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

RENIO (Re)
El renio, un producto secundario de la producción del cobre y el molibdeno, es uno de los metales más raros y costosos. Hace unos diez años, su escasez obligó a los ingenieros de General Electric a desarrollar nuevas aleaciones para las palas de las turbinas de los aviones.

PLOMO (Pb)
El consumo de plomo está aumentando debido, sobre todo, a la demanda de baterías de emergencia y de vainas protectoras para cables subterráneos. No existen materiales alternativos para tales aplicaciones, si bien algunas técnicas investigadas desde hace tiempo, como las pilas de combustible, podrían sustituir a las baterías con plomo.

Rendimiento de los sustitutos

Excelente — Malo


Elemento no evaluado



TECNOLOGÍA

Un nuevo muñeco para los accidentes de tráfico

Un elaborado modelo informático promete mejorar la seguridad de los vehículos

Los maniquíes pueden ser de gran ayuda para evaluar los riesgos de un accidente de tráfico, pero las pruebas estandarizadas que los fabricantes de automóviles efectúan con ellos dejan que desear. A los ingenieros les suele resultar difícil modelizar los golpes provenientes de ciertas direcciones o predecir las consecuencias de los traumatismos en algunas zonas del cuerpo, como las vértebras lumbares o el abdomen. Para solucionar esas deficiencias, más de una veintena de compañías automovilísticas e institutos de investigación han aunado esfuerzos con el objetivo de diseñar un complemento digital: un elaborado modelo informático en tres dimensiones que representa los huesos, los

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Antes la pareja que el sustento

El fuerte vínculo en las parejas de carboneros ayuda a llevar adelante la crianza

Como la mayoría de las aves, el carbonero común es, mayoritariamente, monógamo. Cada invierno estos vistosos paseriformes vuelven a formar parejas con vistas a la próxima temporada de cría y pasan casi todo el tiempo juntos en labores tan diversas como la vigilancia del territorio, la construcción del nido y la búsqueda de alimento. La solidez del vínculo es palpable, pero ¿qué sucede si se los fuerza a escoger entre el corazón y el estómago?

A fin de descubrirlo, el zoólogo de la Universidad de Oxford Josh A. Firth y sus colaboradores distribuyeron comederos por un bosque cercano de la campiña inglesa. La portezuela de algunos solo se abría si el ave estaba marcada con un microchip acabado en número impar, mientras que otros solo permitían la entrada a los números pares. Por tanto, los miembros de las parejas con cifras iguales (pares o impares) podían abrir los mismos comederos y darse un atracón de semillas de girasol. En cambio, las parejas mixtas (formadas por un miembro par y otro impar) se veían obligadas a comer en puntos diferentes.

A lo largo de tres meses, los investigadores observaron metódicamente a 17 parejas, siete de ellas mixtas, por lo que no podían comer en los mismos comederos. Comprobaron que los integrantes de estas últimas visitaban los comederos vetados casi cuatro veces más a menudo que los de las parejas iguales, lo cual parece indicar que permanecían juntas aunque uno de sus miembros no pudiera comer. Los resultados se publicaron el pasado diciembre en *Current Biology*. Las parejas de carbonero común se mantienen unidas aunque uno esté hambriento porque se necesitarán más tarde. «El vínculo amoroso es vital para el carbonero», asegura Firth. «Un progenitor no puede afrontar solo la crianza de la pollada. Su única esperanza reside en contar con una pareja de confianza.»

Andrew King, etoecólogo de la Universidad de Swansea en Gales, opina que este hallazgo se suma a observaciones semejantes en muchas otras especies, de primates a peces. Asegura que «obtener menos alimento por andar buscándolo en compañía es, pese a todo, mejor que llenar el buche en solitario». De hecho, muchos de los pájaros frustrados del experimento se las apañaron para hacerse con comida de su compañero, aprovechando el intervalo de dos segundos antes de que la trampilla del comedero se cerrara.

—Jason G. Goldman



STEVE HATHAWAY, GETTY IMAGES (*maniquí*); BUITEN-BEELD, ALAMY (*carboneros*)

tejidos y los órganos internos de la cabeza a los pies. El grupo, bautizado como Consorcio Mundial de Modelos del Cuerpo Humano (GHBMC), ya ha creado un modelo para un adulto de unos 80 kilos. Ahora se propone extenderlo a fin de que incluya toda una variedad de complexiones físicas y escenarios de tráfico.

—*Peter Andrey Smith*

DE TODAS LAS FORMAS Y TAMAÑOS

La mayoría de los accesorios de seguridad de los automóviles están pensados para el hombre adulto medio, lo que, en particular, puede comprometer la protección de los niños. El cuerpo infantil muestra unas propiedades mecánicas diferentes de las del adulto, por lo que uno de los objetivos del consorcio es adaptar sus modelos a las características anatómicas de los más pequeños, entre otras variaciones de sexo y edad. Un modelo similar de un niño de diez años ya está ayudando a Anil Kalra y Ming Shen, investigadores posdoctorales de la Universidad estatal de Wayne, a diseñar nuevos parachoques que, en caso de atropello, aumenten la probabilidad de que los peatones más jóvenes caigan de manos y no de cabeza.

PREDICCIÓN DE LESIONES

Si sobreviene un accidente, los vehículos de General Motors equipados con el sistema telemático OnStar ya toman datos, como la fuerza y dirección del impacto, calculan la probabilidad de que los pasajeros hayan sufrido heridas de gravedad y envían su evaluación a los equipos de socorro. J. T. Wang, ingeniero de General Motors y uno de los principales asesores técnicos del GHBMC, cree que los modelos virtuales del consorcio podrían facilitar la ejecución de simulaciones en tiempo real, lo que proporcionaría un retrato más fiel del accidente. «Tal vez podamos predecir el tipo de lesiones antes de que lleguen los servicios de emergencia», señala el investigador. Esa información aportaría pistas clave sobre el estado de las víctimas halladas en estado de inconsciencia.

COCHES SIN CONDUCTOR

No parece probable que la anunciada retirada de los conductores —y, con ello, de los errores humanos— acabe con las lesiones por accidente. Jingwen Hu, del Instituto de Investigaciones sobre el Transporte de la Universidad de Michigan, considera que los modelos del GHBMC serán fundamentales para afinar los accesorios de seguridad de los futuros coches sin conductor, los cuales tienen mecanismos de operación diferentes y podrían disponer de configuraciones de asientos distintas de las habituales. En un estudio reciente financiado por Ford, Hu halló que, justo antes de una colisión, el sistema de frenado de los automóviles con asistencia a la conducción tendía a alterar la postura de los pasajeros frontales. Como resultado, el cráneo se inclina hacia delante, lo que aumenta el riesgo de lesiones en la cabeza. Asimismo, puede que pronto dichos modelos permitan reevaluar el funcionamiento de *airbags* y cinturones de seguridad en los nuevos vehículos.



LAS MARTAS pescadoras son animales solitarios.

AGENDA

CONFERENCIAS

17 de febrero
Los juegos de cartas vistos por Cardano: cartas marcadas
Mary Sol de Mora Charles, Universidad del País Vasco
XXXVII Seminario de Historia de la Matemática
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.mat.ucm.es/shm

EXPOSICIONES

SOS: La ciencia de prevenir
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

OTROS

3 de febrero - Mesa redonda
¿Es la vida un patrimonio único de la Tierra?
Josep M. Trigo, Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (moderador)
Ciclo «Divulgar en la calle»
Librería Documenta
Barcelona
www.uab.cat > sala de prensa

3, 10, 17 y 26 de febrero - Ciclo de seminarios
Identidades e identificaciones: Pasado y presente
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero
Valencia
www.uv.es > ciclos de seminarios

5, 19 y 26 de febrero - Teatro
Pius Font i Quer: Passió per la botànica
Tercera obra del proyecto *Theatrum Sapientiae*
Universidad de Barcelona
Barcelona
www.ub.edu/laubdivulga

25 de febrero - Mesa redonda
La no capacidad: una etapa transitoria. El papel de la tecnología en las personas con diversidad funcional
Actividad en torno a la exposición *+Humanos* (CCCB)
Ateneo Barcelonés
Barcelona
www.cccb.org > actividades



CONSERVACIÓN

Mamíferos amenazados por plaguicidas

Los daños vienen de los matarratas empleados en los cultivos ilegales de marihuana

La marta pescadora, de la familia de los mustélidos de la talla de un gato, habita en algunos bosques recónditos de California. El trampeo y la tala iniciados en el siglo XIX redujeron sus efectivos a unos miles de individuos; aunque esas amenazas han ido a menos, han surgido otra nueva: los plaguicidas vertidos en las plantaciones ilegales de marihuana. Miles han aflorado por todo el estado, concentradas en los bosques de titularidad pública, a pesar de las opciones de cultivo legal que brinda la ley de California para el uso medicinal de la marihuana, de 1996.

Mourad W. Gabriel, director ejecutivo de Integral Ecology Research Center, organización sin ánimo de lucro, fue el primero en sospechar del vínculo entre el reguero de muertes de marta y el cannabis californiano, allá por 2011. Las necropsias han demostrado que el matarratas es la causa de la muerte, pero se ignoraba de dónde procedía. En una conferencia de expertos en fauna silvestre celebrada el año pasado, un oficial de policía le dijo que los agentes solían hallar ese veneno en las parcelas ilegales plantadas en tierras públicas e indígenas. El veneno se esparce infringiendo las normativas de control de plagas que los agricultores deben cumplir. Las martas no son la alimaña que se pretende exterminar, pero (junto con el oso negro, el zorro gris y otros muchos animales) mueren por las hemorragias internas que causan la ingesta del cebo o de roedores envenenados.

Así que Gabriel y su colega Mark Higley, biólogo del Servicio Forestal de la Tribu Hupa, comenzaron a participar como observadores en las redadas contra las plantaciones, en ocasiones descendiendo como comandos por cuerdas desde el helicóptero policial. Casi sin excepción, hallaron los venenos que matan las martas (unos aún en su envoltorio y otros esparcidos por doquier), algunos de ellos prohibidos en EE.UU. Una investigación minuciosa reveló que la única fuente posible de los plaguicidas repartidos por el bosque era esa; el equipo había encontrado el culpable.

Los investigadores dieron a conocer el problema el pasado noviembre en *PLOS ONE*. De las 129 martas pescadoras equipadas con collar de radioseguimiento cuya muerte se pudo determinar a lo largo de ocho años, el veneno esparcido por los cultivadores ilegales había matado a 13. Semejante pérdida es tremenda para una población que pronto podría figurar en la lista de especies amenazadas del país. Para empeorar aún más las cosas, el 85 por ciento de las 101 martas examinadas entre 2012 y 2014 habían estado en contacto con raticidas; las supervivientes acaban así intoxicadas, con el consiguiente perjuicio para su salud y sus actividades vitales (caza, reproducción, capacidad de huida ante depredadores).

Los cultivadores ilegales también acaparan millones de litros de agua y abandonan montañas de residuos, desde bombonas de propano y fertilizantes hasta envoltorios de caramelos y baterías de automóvil, en terrenos donde no existe ningún servicio de limpieza. «Las zonas acaban convertidas en verdaderos yermos», asegura Craig Thompson, ecólogo del Servicio Forestal de EE.UU. y autor principal de un artículo publicado en 2014 que revela que la cercanía de los cultivos ilegales agrava la mortalidad de las martas. «Es tremenda la destrucción que puede causar una parcela de una hectárea escasa.» California es de largo el mayor productor de marihuana de Estados Unidos; la Administración de Control de Drogas (DEA) informa que, de los 3,9 millones de plantas decomisadas al aire libre en todo el país en 2014, el 62 por ciento procedía de ese estado. «Están por todos lados», advierte el capitán Nathaniel Arnold, del Departamento de Pesca y Vida Silvestre de California. Señala que algunos sospechosos han llegado a entablar tiroteos con las fuerzas del orden o a amenazar a ciudadanos que habían tropezado fortuitamente con alguna parcela. Existe el riesgo de que ese tipo de incidentes disuada a los investigadores de intervenir en el conflicto cultural que envuelve a la marihuana en estos momentos. Pero, tal y como subraya Higley, los conservacionistas no condenan la marihuana en sí. «No se puede cultivar nada en el bosque. Sea lo que sea», afirma.

—Jesse Greenspan

JOEL SARTORE, GETTY IMAGES (*marta*); CENTRO DE CULTURA CONTEMPORÁNEA DE BARCELONA (*armadura*)

ESPACIO

Exoplanetas: los próximos 20 años

Los investigadores ya han descubierto cerca de 2000 mundos fuera del sistema solar. Ahora esperan entenderlos

ALEXANDRA WITZE

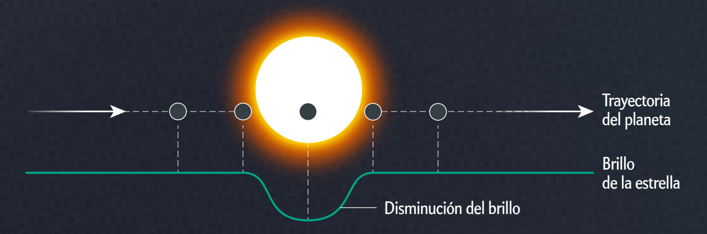
El pasado mes de octubre se cumplieron veinte años del anuncio del descubrimiento de 51 Pegasi b, el primer exoplaneta confirmado en torno a una estrella similar al Sol. Aquel gigante gaseoso (un mundo infernal situado a muy poca distancia de su estrella anfitriona) abrió las puertas a la sorprendente diversidad de planetas existentes en nuestra galaxia.

A fecha de noviembre de 2015, el número de planetas extrasolares conocidos ascendía a 1978, con otros casi 4700 candidatos a la espera de ser confirmados. A finales de ese mes, un congreso reunió en Hawái a la comunidad de expertos para analizar la diversidad de mundos hallados hasta ahora y diseñar una estrategia para las próximas dos décadas. Esta infografía resume qué se sabe hasta el momento y qué queda por hacer.

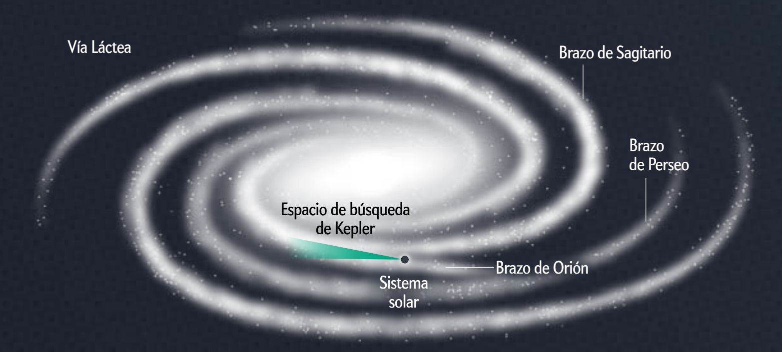


La búsqueda hasta ahora

La mayor cosecha de exoplanetas lograda hasta la fecha es, con gran diferencia, la obtenida por el observatorio espacial Kepler, de la NASA (*arriba*). Durante cuatro años, este instrumento ha estado rastreando una pequeña porción de cielo en busca de estrellas cuyo brillo mostrase mitigaciones periódicas, signo de que un planeta podría estar cruzando por delante. Aunque la misión principal concluyó en 2013, por el momento el telescopio sigue trabajando gracias a la extensión K2 aprobada por la NASA.

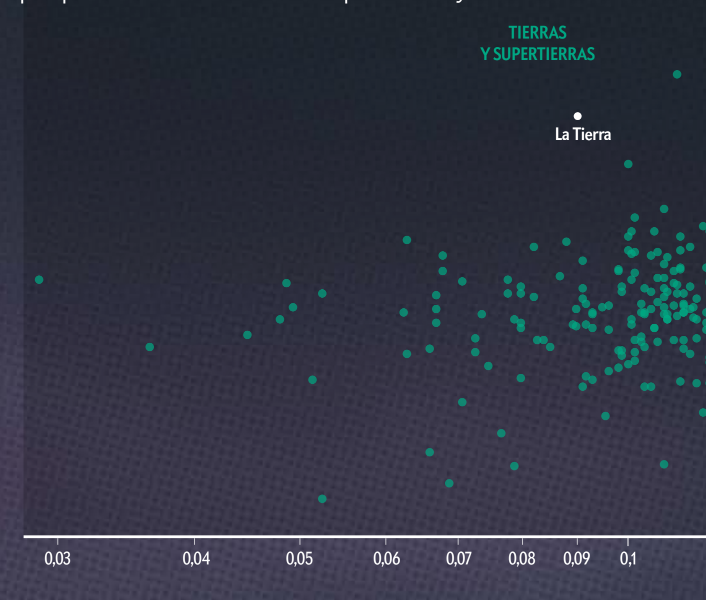


El campo de visión de Kepler apenas cubre 1/400 del cielo.



LOS MUNDOS QUE CONOCEMOS

Buena parte de los exoplanetas descubiertos hasta ahora son sorprendentemente distintos de los ocho planetas que pueblan nuestro sistema solar; desde enormes bolas de gas que orbitan rozando su estrella hasta mundos de hielo que transitan mucho más lejos. En ese abanico, los astrónomos han descubierto un puñado de planetas similares a la Tierra y situados en la «franja de habitabilidad» de su estrella anfitriona, donde en principio se dan las condiciones adecuadas para la vida tal y como la conocemos.



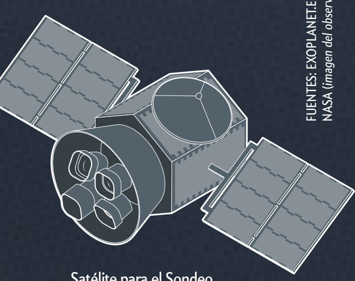
LA PRÓXIMA FRONTERA

Ahora los expertos tendrán que decidir qué hacer con este aluvión de nuevos planetas. Uno de los objetivos de cara a las próximas dos décadas consistirá en recopilar datos sobre ellos, como los referentes a la existencia de nubes o a la clase de condiciones que reinan en su superficie.

FUENTES: EXOPLANET.EU (*diagrama de distribución de planetas*); NASA (*imagen del observatorio Kepler*)

Proyectos futuros

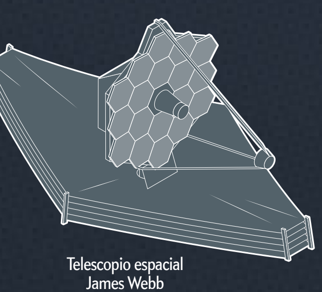
GENERADOR DE IMÁGENES DE PLANETAS GEMINI (GPI)
Esta misión tratará de distinguir entre el calor generado por los planetas y el que emana de sus estrellas anfitrionas. Ello permitirá medir directamente características como su masa, temperatura y composición atmosférica.



Satélite para el Sondeo de Tránsitos de Exoplanetas

SONDEO DE TRÁNSITOS DE NUEVA GENERACIÓN (NGTS)
Un proyecto en curso para buscar exoplanetas en los cielos del hemisferio sur.

SATÉLITE PARA EL SONDEO DE TRÁNSITOS DE EXOPLANETAS (TESS)
Este observatorio espacial, cuyo lanzamiento está programado para 2017, buscará mundos rocosos alrededor de estrellas brillantes cercanas. Después, los astrónomos podrán seguir estudiándolos con telescopios terrestres.



Telescopio espacial James Webb

TELESCOPIO ESPACIAL JAMES WEBB
Con el lanzamiento previsto para 2018, este instrumento analizará atmósferas planetarias en longitudes de onda infrarrojas con miras a estudiar su composición química.

PLATO
Este observatorio espacial, que empezará a operar en 2024, buscará mundos similares a la Tierra en la franja de habitabilidad de hasta un millón de estrellas.

Artículo original publicado en *Nature* 527, págs. 288-289, 2015.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015
Con la colaboración de nature

Kepler-452 b
El exoplaneta más parecido a la Tierra conocido hasta ahora

NEPTUNOS CALIENTES

JUPÍTERES CALIENTES

51 Pegasi b
Primer exoplaneta descubierto en torno a una estrella similar al Sol

GJ 436 b
Un «neptuno caliente» descubierto antes del lanzamiento de Kepler

HD 149026 b
Ejemplo típico de planeta muy próximo a su estrella, con temperaturas superficiales de más de 2000 grados centígrados

Período orbital (días, escala logarítmica): 100.000, 10.000, 1000, 100, 10, 1, 0,1

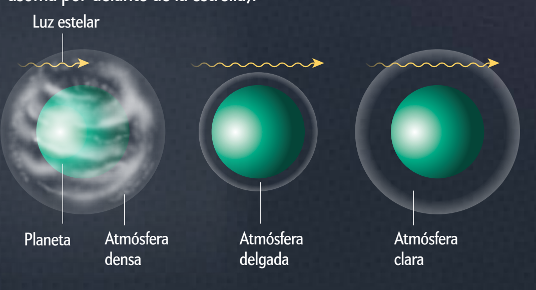
Radio del planeta (radios de Júpiter, escala logarítmica): 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1, 2

¿Cuántos hay?

Aunque quedan innumerables exoplanetas por descubrir, los astrónomos comienzan a hacerse una idea de qué fracción de ellos tendrían el tamaño de la Tierra y podrían poseer agua líquida. Las estrellas más comunes en la galaxia son las enanas de tipo M, más pequeñas y frías que el Sol. Los expertos estiman que puede llegar a haber un planeta del tamaño de la Tierra por cada dos enanas de tipo M. Una pequeña proporción de ellos podrían ser habitables.

¿Cómo son?

El próximo reto consistirá en analizar las atmósferas de los exoplanetas a partir de los cambios que experimenta la luz de su estrella anfitriona cuando las atraviesa (es decir, cuando, visto desde la Tierra, el planeta asoma por delante de la estrella).



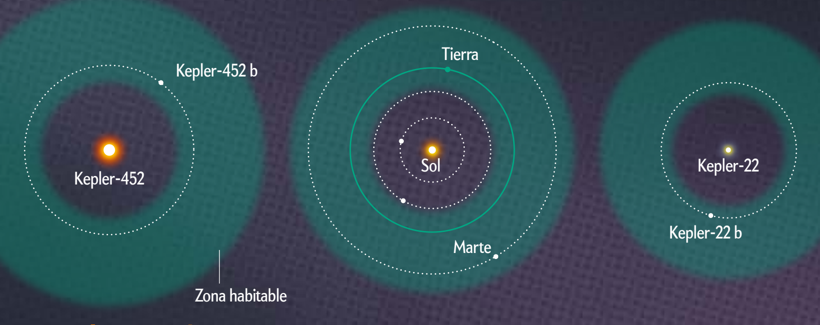
La forma en que la atmósfera absorbe la luz de la estrella puede revelar la presencia de nubes o la existencia de agua, entre otros compuestos.

Ejemplo de espectro en una atmósfera densa
Ejemplo de espectro en una atmósfera clara



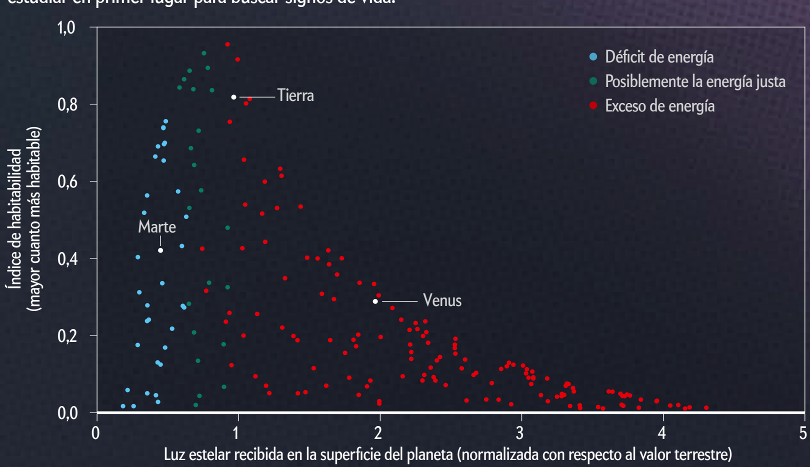
¿Son habitables?

Los mundos más interesantes son aquellos situados en la franja de habitabilidad de su estrella anfitriona; es decir, en la región donde la temperatura permitiría la existencia de agua líquida en la superficie del planeta. El tamaño y la posición de la zona habitable dependen del brillo de la estrella; cuanto más tenue sea esta, más próxima se encontrará la franja de habitabilidad.



¿Hay alguien ahí?

Tal vez. Ahora el reto consistirá en decidir qué exoplanetas estudiar más a fondo. Hace poco, los investigadores definieron un «índice de habitabilidad» para cuantificar la probabilidad de que un mundo dado presente agua líquida en su superficie. Dicho índice puede compararse con otros datos, como la cantidad de luz estelar que recibe el planeta, a fin de determinar qué mundos conviene estudiar en primer lugar para buscar signos de vida.



FUENTES: «INFRARED TRANSMISSION SPECTROSCOPY OF THE EXOPLANETS HD 209458B AND XO-1B USING THE WIDE FIELD CAMERA-3 ON THE HUBBLE SPACE TELESCOPE», D. DEMING ET AL. EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 774, N.º 2, SEPTIEMBRE DE 2013 [CC-BY-3.0] (*espectros*); «COMPARATIVE HABITABILITY OF TRANSITING EXOPLANETS», R. BARNES, V. S. MEADOWS Y N. EVANS EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 814, N.º 2, NOVIEMBRE DE 2015 (*gráfica de habitabilidad*)

NANOTECNOLOGÍA

Control atómico de un transistor molecular

Una nueva técnica ha permitido fabricar y analizar con una precisión sin precedentes un transistor cuyo canal de transporte eléctrico consiste en una sola molécula

JESÚS MARTÍNEZ BLANCO

En 1974, Arieh Aviram, de IBM, y Mark A. Ratner, de la Universidad de Nueva York, propusieron emplear moléculas individuales a modo de componentes electrónicos, como rectificadores, resistencias o transistores. Desde entonces, la idea ha sido explorada por un gran número de investigadores en la búsqueda de los límites últimos de la miniaturización en electrónica. Sin embargo, toda tecnología basada en componentes moleculares requerirá no solo fabricar tales dispositivos, sino controlarlos y entender su funcionamiento a escala atómica. Hoy por hoy, este objetivo aún se enfrenta a varias dificultades.

El año pasado, en el curso de una investigación llevada a cabo en el Instituto Paul Drude de Berlín, logramos construir, visualizar y analizar las propiedades de transporte eléctrico de una sola molécula cuyo comportamiento como transistor conseguimos controlar con un detalle sin precedentes. Nuestro trabajo, publicado en *Nature Physics*, fue posible gracias a la microscopía de efecto túnel y a las posibilidades de manipulación atómica que esta técnica ofrece.

Los transistores son los componentes básicos de todos nuestros aparatos electrónicos. En términos sencillos, podemos definirlos como dispositivos cuya capacidad para dejar pasar la corriente puede regularse por medios externos, como si se tratase de pequeños interruptores. En los transistores de efecto campo, los más comunes hoy en día, ello se consigue interponiendo entre dos electrodos (llamados fuente y drenaje), un material (el canal) cuya conductividad puede ajustarse mediante la aplicación de un campo eléctrico a través de un tercer electrodo (la compuerta).

El primer transistor, fabricado en 1947, se componía de pequeños bloques de material semiconductor. Su desarrollo se debió a William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain, de los Laboratorios Bell, quienes solo nueve años después recibirían por ello el premio Nobel de física. Su revolucionario invento permitió eliminar las aparatosas válvulas de vacío de los primeros ordenadores, lo que hizo posible integrar un mayor número de transistores en los circuitos y, de esta manera, aumentar la potencia de cálculo. Así comenzó la andadura de una industria multimillonaria que, en la actualidad, es capaz de integrar miles de millones de transistores en cada uno de nuestros aparatos electrónicos.

ELECTRÓNICA MOLECULAR: La microscopía de efecto túnel ha permitido construir un transistor basado en una molécula de ftalocianina (*violeta*) y analizar su comportamiento con gran detalle. La punta del microscopio permite no solo manipular la molécula (*flecha*) y visualizarla, sino construir la nanoestructura de átomos de indio (*gris*) cuyo potencial eléctrico imita el efecto del electrodo compuerta de un transistor tradicional. Las imágenes reales de la molécula sometida a un potencial de compuerta bajo (*abajo, izquierda*) y alto (*derecha*) reflejan el cambio en su carga y orientación.

CORTESÍA DEL AUTOR (*recreación artística del transistor molecular*); DE: «GATING A SINGLE-MOLECULE TRANSISTOR WITH INDIVIDUAL ATOMS», POR JESÚS MARTÍNEZ BLANCO ET AL. EN *NATURE PHYSICS*, VOL. 11, PÁGS. 640-644, AGOSTO DE 2015 (*imágenes de efecto túnel*)

En los límites de la miniaturización

El tamaño de los transistores ha ido reduciéndose desde entonces de manera ininterrumpida. Sin embargo, y a pesar de sus diminutas dimensiones, hoy estos dispositivos siguen siendo unas veinte veces mayores que una molécula. Si pudiéramos usar moléculas individuales como transistores, habríamos dado el último paso en la carrera por la miniaturización.

Pero ¿podemos usar una molécula como transistor? La respuesta es afirmativa, ya que una molécula actúa como una diminuta caja de resonancia en la que los electrones solo pueden fluir con facilidad cuando alcanzan determinadas energías. De esta manera, la corriente eléctrica circulará o no dependiendo de si hay algún nivel energético molecular compatible con la energía de los electrones que buscan saltar del electrodo fuente al drenaje. Ello requiere ajustar el alineamiento de dichos niveles con respecto al voltaje entre dichos electrodos.

Aunque la teoría suena muy bien, las diminutas dimensiones de una molécula hacen extremadamente difícil saber con certeza dónde y cómo se conecta con los

electrodos. Esta falta de reproducibilidad impide controlar el diseño de un transistor molecular, cuyas características de transporte eléctrico muestran una gran sensibilidad a la geometría del contacto entre la molécula y los electrodos. Una dificultad aún mayor suele ser la incorporación del tercer electrodo (la compuerta) lo suficientemente cerca de la molécula y con la minuciosidad necesaria para ejercer un control preciso del campo eléctrico que ha de modular el transistor.

Compuerta atómica

Cuando comenzamos nuestra investigación, estábamos estudiando las opciones de manipulación atómica y el transporte eléctrico en las ftalocianinas, pequeñas moléculas orgánicas de en torno a un nanómetro de tamaño. Para visualizarlas usamos un microscopio de efecto túnel, un dispositivo con una punta tan afilada que acaba en un solo átomo y que es posible mover con gran precisión cerca de la superficie que contiene las moléculas que deseamos analizar.

Gracias a su diseño, la propia geometría del instrumento de medida ya proporciona dos electrodos (la punta y la superficie) entre los que colocar una molécula. Dichos electrodos pueden usarse como fuente y drenaje de un hipotético transistor molecular. De hecho, esta configuración ha sido explorada por numerosos investigadores en el pasado, ya que la técnica posibilita además la visualización directa de la molécula. Sin embargo, existe un problema aparentemente insalvable: la ausencia del electrodo compuerta, el tercer terminal requerido para el transistor.

La solución que hemos propuesto consiste en dopar la superficie en las cercanías de la molécula con átomos de indio dotados de carga positiva. El campo electrostático generado por estos átomos modifica la estructura electrónica de la ftalocianina, lo que imita el efecto del electrodo compuerta. La buena noticia es que el microscopio permite ajustar la configuración con precisión atómica: al cubrir la punta con átomos de indio, estos pueden traspasarse uno a uno y de forma controlada a la superficie. Gracias a estudios anteriores, sabíamos que dicha superficie debía ser de arseniuro de indio, un compuesto capaz de tomar un electrón de cada átomo depositado y convertirlo en una partícula con carga positiva.

Al analizar el transporte eléctrico de la molécula en diferentes entornos electrostáticos (es decir, con distintos potenciales eléctricos de compuerta), comprobamos que esta presentaba todas las características que cabía esperar de un transistor molecular. Visualizar la molécula con el microscopio nos ayudó a descubrir, además, que su orientación cambiaba en función de la carga eléctrica. A escalas tan diminutas, este detalle influye de manera notable en el transporte eléctrico del transistor, por lo que su conocimiento contribuirá de manera importante al diseño de futuros dispositivos.

Es previsible que, de aquí en adelante, la idea de construir nanoestructuras dotadas de carga eléctrica permita estudiar otras moléculas que puedan actuar a modo de transistores. En última instancia, el objetivo consistirá en entender con todo el detalle posible el funcionamiento de estos diminutos dispositivos con miras a la electrónica del futuro.

—Jesús Martínez Blanco
Instituto Paul Drude de Electrónica del Estado Sólido
Berlín

PARA SABER MÁS

Molecular rectifiers. A. Aviram y M. A. Ratner en *Chemical Physics Letters*, vol. 29, págs. 277-283, noviembre de 1974.
Gating a single-molecule transistor with individual atoms. J. Martínez Blanco et al. en *Nature Physics*, vol. 11, págs. 640-644, agosto de 2015.
Molecular Transistor. Aplicación web desarrollada por el autor donde se explica la idea del estudio de forma interactiva: **http://chumo.github.io/MolecularTransistor/**

EN NUESTRO ARCHIVO

Computación molecular. Mark A. Reed y James M. Tour en *IyC*, agosto de 2000.
Transistores moleculares. Enrique del Barco en *IyC*, julio de 2008.
Más allá de la ley de Moore. John Pavlus en *IyC*, julio de 2015.

BIOTECNOLOGÍA

La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes

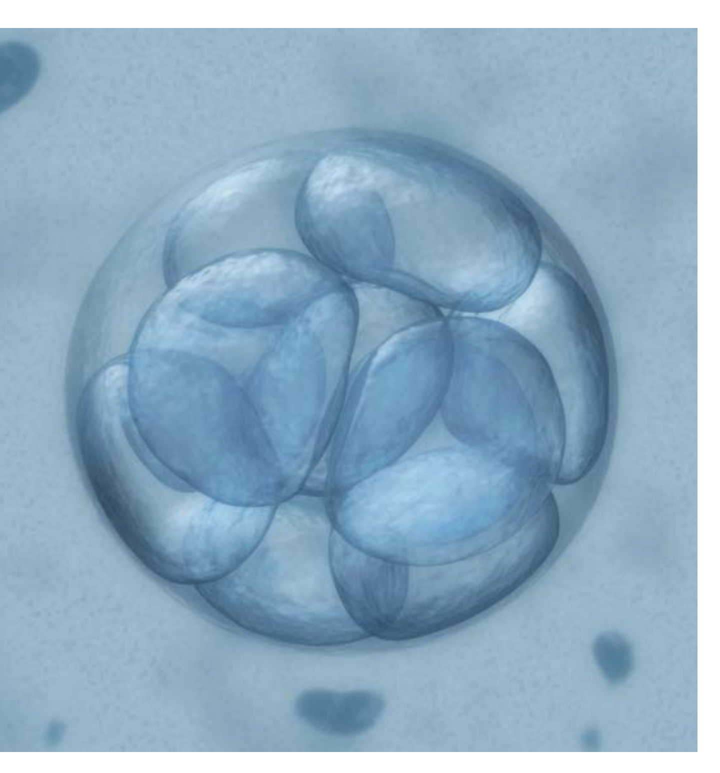
Representantes de diversos países se reúnen para unificar posturas sobre las cuestiones éticas, sociales y legales en torno a esta técnica

SARA REARDON

El pasado diciembre, casi 500 personas entre científicos, especialistas en cuestiones éticas y legales, y grupos de defensa de más de veinte países se reunieron en Washington D.C. para consensuar unas directrices sobre el uso de la edición genética en seres humanos —un hecho que ilustra la gran influencia que ejerce la ingeniería genética sobre la sociedad.

Cuarenta años antes, en 1975, un grupo compuesto fundamentalmente por científicos estadounidenses asistieron a una conferencia paradigmática en Asilomar, California, y establecieron unas pautas rigurosas para el uso de herramientas que permitían combinar ADN de distintas especies. En la actualidad, con un grupo mucho más diverso, el acuerdo ha sido bastante menos definitivo: solo se ha recomendado no detener la edición genética en humanos pero sí evitar la investigación y los usos de embriones humanos modificados para provocar un embarazo.

La Cumbre Internacional sobre la Edición Genética en Humanos tuvo lugar del 1 al 3 de diciembre y fue organizada por las estadounidenses Academia Nacional de Ciencias y Academia Nacional de Medicina, la Sociedad Real de Londres y la Academia de las Ciencias China (de sus siglas en inglés, CAS). En la reunión se pudo observar la fuerza con la que está emergiendo China en el campo de la genómica. En concreto, gran parte de la discusión tuvo lugar en torno a un



LA MODIFICACIÓN GENÉTICA de embriones humanos está generando polémica y exige un profundo debate bioético.

trabajo aparecido en *Protein Cell*, en el que Puping Liang y sus colaboradores utilizaron la técnica de edición genética CRISPR-Cas9 para modificar un gen en embriones humanos no viables.

La declaración de principios publicada por los organizadores al final de la reunión no condenó tales experimentos, a pesar de que insistía en que deberían resolverse diversas consideraciones éticas y de seguridad antes de que los embriones se modifiquen para usos clínicos.

Numerosos países ya han limitado la investigación con embriones humanos. China prohíbe explícitamente la implantación de embriones genéticamente modificados en una mujer. Algunos países incluso prohíben la edición genética de embriones humanos en el laboratorio. Philip Campbell, redactor jefe de la revista *Nature* comentó en una presentación que en sus revistas se habían rechazado artículos por no cumplir con las regulaciones locales en lo que atañe a la edición genética de la línea germinal humana.

Éticas, culturas y valores

Las diferencias culturales se hallan detrás de la diversidad de regulaciones, con lo que homogeneizarlas parece complicado. El experto en bioética Renzong Qiu, de la Academia China de Ciencias Sociales, apuntó que, en los Estados Unidos, el debate acerca de si los embriones tienen derechos humanos había dado lugar a las leyes que prohíben el uso de los fondos públicos para investigaciones en las que se crean o destruyen embriones. En China, en cambio, este aspecto no es ni siquiera parte de la discusión, comentó, ya que «según Confucio, el ser humano comienza a partir del nacimiento».

Según Ephrat Levy-Lahad, investigador del cáncer en la Universidad Hebrea de Jerusalén, es probable que Israel sea favorable al uso clínico de embriones genéticamente modificados. El Gobierno, que apoya el aumento de la natalidad, ya paga a los padres que recurren a la fecundación in vitro para que examinen sus embriones en busca de mutaciones genéticas. La técnica empleada, conocida como diagnosis genética preimplantación, es más simple que la edición genética y puede prevenir numerosas enfermedades hereditarias.

Los organizadores de la reunión de Washington no solo traspasaron las fronteras nacionales sino también los límites de las distintas disciplinas. Los especialistas en ciencias sociales y ética expresaron sus preocupaciones sobre la desigualdad y la discriminación que podría generar la alteración del genoma humano (en un futuro lejano, los padres ricos podrían elegir el color de la piel de sus hijos). Por su parte, el sociólogo Ruha Benjamin, de la Universidad de Princeton, expresó su temor por las tensiones y diferencias acerca de qué rasgos deben considerarse enfermedades (muchas personas sordas, por ejemplo, no se ven a sí mismas como discapacitadas y quieren que sus hijos compartan la cultura de la sordera).

Jinghua Cao, director general adjunto de la Oficina de Cooperación Internacional de la CAS, dijo que no había oído hablar de tales preferencias. «Es una perspectiva muy alejada de la manera de mirar las cosas en China», dijo. «Aunque es bueno que seamos conscientes de esa perspectiva, creemos que va demasiado lejos.»

A pesar de las diferencias sobre los límites de la edición genética en el nonato, casi todos los asistentes estuvieron de acuerdo en que los esfuerzos para corregir defectos después del nacimiento en células no reproductoras debe continuar. Qi Zhou, biólogo del desarrollo del Instituto de Zoología de la CAS, en Pekín, se mostró sorprendido al ver los rápidos avances de los países occidentales en el uso clínico de esta técnica. En los Estados Unidos y el Reino Unido están planeados o en curso ensayos de edición genética para tratar leucemia, VIH y hemofilia. Dado que en China no existe ninguna regulación específica para tales tratamientos, Zhou expresó su intención de hablar de este tema con el Gobierno cuanto antes.

Teniendo en cuenta la diversidad de opiniones expresadas en la reunión, los organizadores reconocen que constituye solo el primer paso. Muchos países no tuvieron representación y en la agenda se incluyeron pocas presentaciones de personas con enfermedades genéticas. En un momento, la madre de un niño nacido con una mutación heredada tomó el micrófono para describir entre lágrimas cómo una enfermedad genética había destruido el cuerpo de su hijo a través de convulsiones durante sus seis días de vida. Su historia generó una emoción colectiva bastante inusual en conferencias científicas. «Si tenéis las habilidades y el conocimiento para curar estas enfermedades, entonces simplemente hacedlo», dijo.

—Sara Reardon
Periodista científica

Artículo original publicado en *Nature* 528, pág. 173, diciembre de 2015.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

Con la colaboración de **nature**

PARA SABER MÁS

CRISPR/Cas9-mediated gene editing in human tripronuclear zygotes. Puping Liang et al. en *Protein Cell*, vol. 6, págs. 363-372, mayo de 2015.
Genome editing. *Nature Outlook*, diciembre de 2015. Disponible en **www.nature.com/nature/outlook/genome-editing**
Página web de la Cumbre Internacional sobre la Edición Genética en Humanos: **www.nationalacademies.org/gene-editing/Gene-Edit-Summit**

EN NUESTRO ARCHIVO

La edición genética, más precisa. Margaret Knox en *IyC*, febrero de 2015.
Riesgos de la edición genética. Jeantine Lunshof en *IyC*, agosto de 2015.

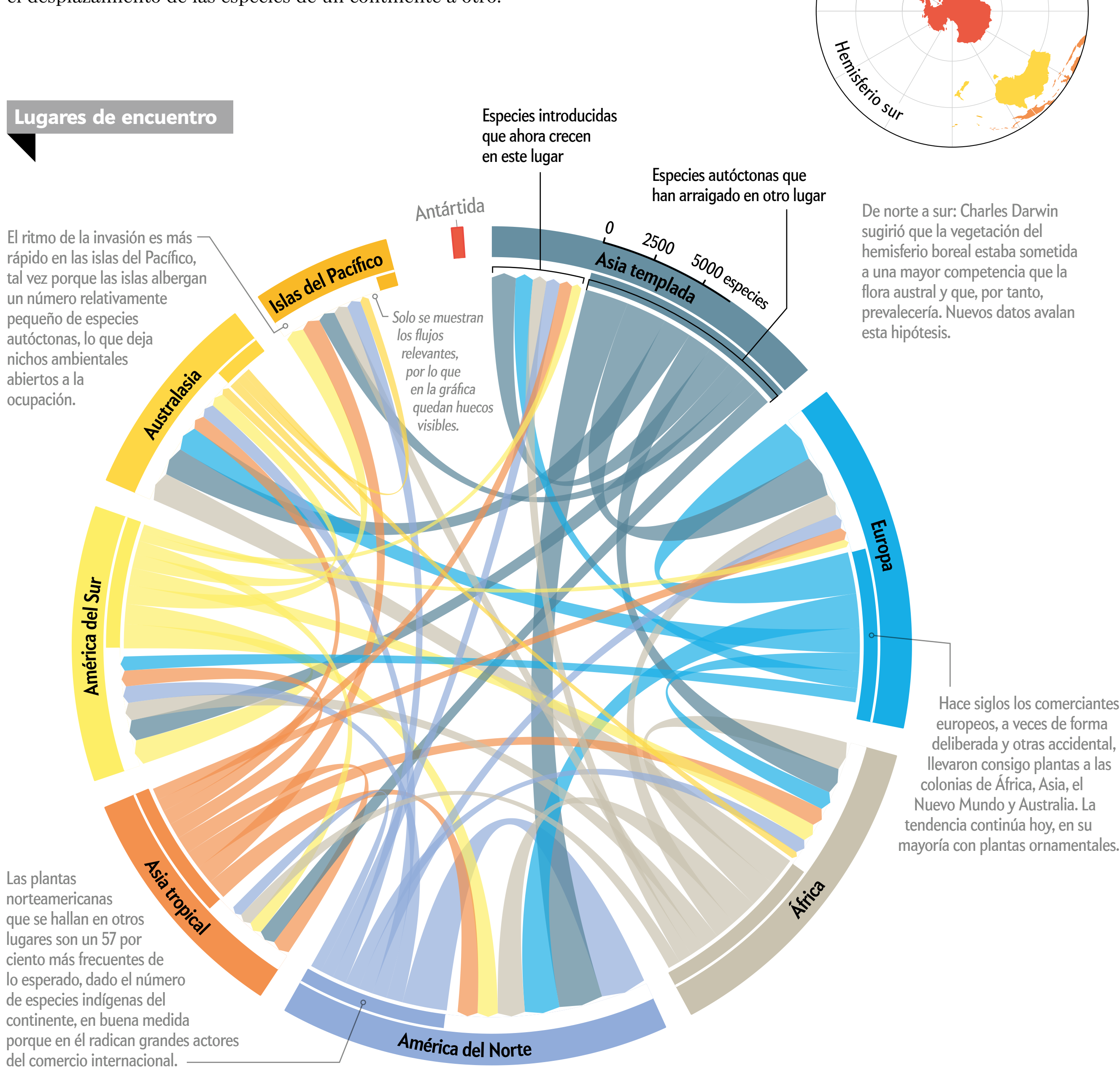
BOTÁNICA

Invasoras del norte

Las plantas que colonizan ambientes nuevos tienden a proceder del hemisferio boreal

MARK FISCHETTI

América del Sur y Asia tropical albergan la flora más rica del planeta, por lo que cabría pensar que fueran la cuna de la mayoría de las plantas invasoras. Pero no sucede así, según un nuevo análisis de las bases de datos mundiales de flora dirigido por Mark van Kleunen, de la Universidad de Constanza. Los resultados demuestran que el grueso de las plantas introducidas procede de Europa y de las latitudes templadas de Asia. Las cifras también indican que el flujo es mayor hacia el sur que a la inversa, siguiendo en parte las pautas del comercio internacional. Además, es bastante probable que la frecuencia de invasiones esté aumentando, advierte van Kleunen, porque la expansión del comercio y de los viajes en general facilita el desplazamiento de las especies de un continente a otro.



FUENTE: «GLOBAL EXCHANGE AND ACCUMULATION OF NON-NATIVE PLANTS», POR MARK VAN KLEUNEN ET AL., EN *NATURE*, VOL. 535, 3 DE SEPTIEMBRE DE 2015
MARK VAN KLEUNEN (*gráficos*), TERRA CARTA (*mapas*)



INNOVACIÓN

IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO

10 grandes avances para mejorar nuestra calidad de vida, transformar la computación y salvar el planeta

Como venimos haciendo desde 2011, un año más hemos seleccionado para nuestros lectores diez avances técnicos recientes y prometedores que bien podrían convertirse en algunas de las innovaciones más radicales de los próximos tiempos. Nos hemos fijado en un sistema basado en las cámaras para videoconsolas que permitirá controlar con los ojos sillas de ruedas, ordenadores y videojuegos; buenas noticias para las personas con discapacidades motrices. En el campo de la exploración espacial, se está rescatando una idea de 1924, basada en la acción de haces de microondas enviados desde tierra, que podría reducir la cantidad de combustible necesaria para lanzar un cohete al espacio. También nos han parecido interesantes un método que permite identificar de forma precisa y económica todos los virus presentes en una gota de saliva o tejido, y un implante de polímero conductor blando que facilitará el estudio del comportamiento de las neuronas en organismos vivos. En cuanto a retos energéticos, destacamos un nuevo enfoque basado en reactores más pequeños y económicos que se propone convertir por fin en realidad las centrales de energía de fusión, y un espejo que refleja la luz solar y aprovecha el fenómeno del enfriamiento radiativo para extraer calor de su entorno y reducir así la factura energética asociada a la refrigeración de los edificios. También la seguridad biotecnológica protagoniza estas páginas con un mecanismo, basado en la técnica CRISPR, que reducirá el riesgo de contaminación ambiental asociado a una liberación indeseada de ciertos microorganismos modificados genéticamente. No podían faltar los ordenadores basados en las redes de aprendizaje profundo, que están allanando el camino de la inteligencia artificial. En el campo de la química, resulta prometedora la combinación de modelos computacionales y experimentos de espectroscopía para ahondar en la complejidad de los procesos en fase líquida. Y para cerrar esta selección de avances, una sencilla técnica que permite tomar imágenes de objetos que se mueven fuera de nuestro campo de visión.

—La redacción

TAVIS COBURN

Máquinas controladas por el ojo

Un programa informático que traduce los movimientos oculares en instrucciones para controlar diversos dispositivos podría ser una bendición para personas con discapacidades motrices

El pasado mayo, cuando Erik Sorto, un hombre tetrapléjico, consiguió dar una orden mental a un brazo robótico para que le acercara una cerveza a los labios, los medios de comunicación se volvieron locos. Aunque se trata de una hazaña asombrosa, tiene trampa: la tecnología involucrada (un chip con un electrodo implantado en el cerebro de Sorto) es cara, invasiva y a menudo requiere meses de entrenamiento. Peor aún, pocas personas paralíticas tienen el perfil psicológico y físico necesario para usarla.

Sin embargo, quizás exista una alternativa que no requiera un enlace directo entre la actividad eléctrica del cerebro y las máquinas. Aldo Faisal, profesor adjunto de neurotecnología en el Colegio Imperial de Londres, aspira a que sillas de ruedas, ordenadores y videojuegos puedan controlarse con los ojos. Usando cámaras para videoconsolas disponibles en el mercado, Faisal y sus colegas han diseñado unas gafas que registran los movimientos oculares del sujeto y transmiten los datos a un ordenador. Un *software* traduce entonces la información recibida en comandos para la máquina. Este aparato puede ser utilizado casi por cualquiera, incluidas personas tetrapléjicas, con amputaciones, párkinson, esclerosis múltiple o distrofia muscular. Y construirlo cuesta menos de 50 dólares. En una exposición de ciencia, la amplia mayoría de los miles de voluntarios que lo probaron tardó unos 15 segundos en entender el funcionamiento para jugar al Pong sin necesidad de instrucciones.

Los científicos saben desde hace tiempo que los ojos pueden revelar los propósitos de una persona: adónde quiere ir, qué quiere hacer, con quién quiere relacionarse. Aprovechando los 70 años de investigación en neurociencia sobre motilidad ocular, Faisal y sus colaboradores han escrito algoritmos que convierten una mirada en una orden para una silla de ruedas, un guiño en un clic de ratón o un desplazamiento rápido de la pupila en el *swing* de una raqueta virtual. Para predecir la intención del sujeto, los algoritmos dependen de una preparación previa con datos de la vida real, que fueron adquiridos grabando los ojos de voluntarios mientras conducían una silla de ruedas con un mando u operaban un brazo robótico. El *software* aprendió gradualmente a diferenciar, por ejemplo, la manera en que miramos una taza cuando estamos evaluando su contenido o cuando queremos levantarla para darle un sorbo.

Antes de que Faisal pueda comercializar cualquier dispositivo médico basado en su invento, debe obtener financiación para efectuar ensayos clínicos. Entretanto, la Unión Europea le ha concedido a su grupo una subvención de 4 millones de euros para desarrollar exoesqueletos robóticos que una persona paralítica podría controlar con el programa de seguimiento ocular que ha creado. «Me interesa ver qué puedo hacer para ayudar a que estas personas vuelvan a moverse», afirma Faisal. «Es en lo que me centro.»

—*Rachel Nuwer*



Cohetes calentados con microondas

Con haces de energía enviados desde tierra podría conseguirse una forma económica de acceder al espacio

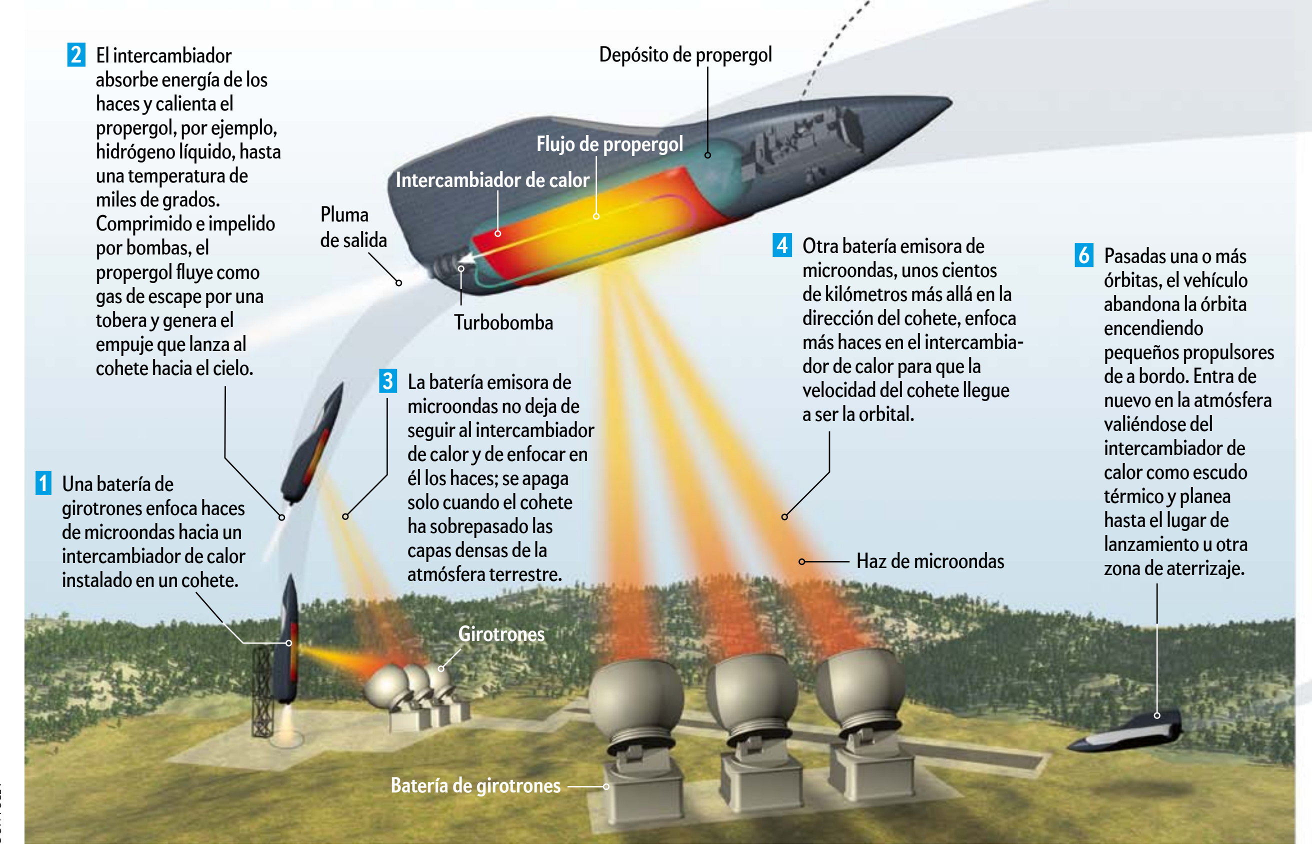
Los humanos llevan lanzando cohetes al espacio desde hace más de cincuenta años. Durante todo ese tiempo, el coste de alcanzar la órbita ha seguido siendo astronómico, entre 5000 y 50.000 dólares por kilogramo, según el cohete. El problema es que ninguno es muy eficiente: alrededor del 90 por ciento del peso corresponde al propergol (combustible), lo que deja poco margen para la carga útil. Si pudiera perderse algo de ese peso, el cohete levantaría más carga y se reduciría el coste de poner un kilogramo de material en órbita.

El científico ruso Konstantín Tsiolkovski propuso en 1924 un modo de conseguirlo: que haces de microondas disparados desde transmisores instalados en tierra aportasen la energía para el ascenso del cohete. Espejos parabólicos apuntarían «un haz de rayos electromagnéticos paralelos de longitud de onda corta» hacia la panza del cohete; así, el propergol se calentaría, generando un empuje sin que hubiese que llevar grandes cantidades de combustible a bordo. Este era, escribió, el método disponible más atractivo «para adquirir velocidad cósmica». La idea estuvo marchitándose hasta hace poco, cuando la tecnología se ha puesto por fin a la altura de la visión de Tsiolkovski. Los láseres de microondas (máseres) se inventaron en los años cincuenta, pero hasta la aparición de generadores mejores y más baratos, los girotrones, no llegaron a las energías de megavatios que se requieren para un lanzamiento espacial. Avances recientes en baterías y otros sistemas de almacenamiento han posibilitado también que se alimenten con energía girotrones de un tamaño suficiente sin que haya que tensar la red eléctrica.

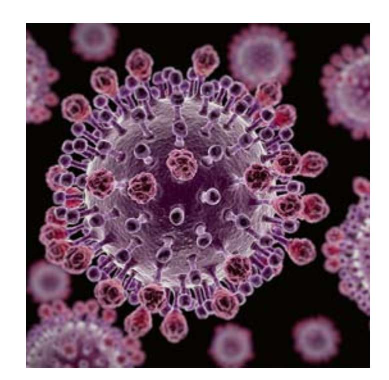
Hoy en día, investigadores de todo el mundo están estudiando la idea. Uno de ellos es Kevin Parkin, que en 2012 dirigió un estudio pionero mientras trabajaba en el Instituto de Tecnología de California. Basándose en parte en la obra de Parkin, una compañía privada, Escape Dynamics, está realizando ahora ensayos para desarrollar un sistema reutilizable alimentado por microondas. Podría lanzar satélites y, en última instancia, seres humanos. La NASA ha tomado nota: en julio añadieron los cohetes energizados por haces de microondas a su hoja de ruta del desarrollo técnico futuro.

—*Lee Billings*

El problema es que ninguno de los cohetes usados hoy en día es muy eficiente



DON FOLEY



EL VIRUS H1N1 de la gripe es uno de los muchos que se atrapan en una única prueba.

Rastreo de virus

Un nuevo método identifica, con una precisión casi perfecta, todos los virus de una muestra

Cuando los médicos quieren identificar los virus que causan una infección, por lo general emplean la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), una técnica que «amplifica» fragmentos dispersos de ADN con el fin de obtener una muestra suficientemente grande para poder analizarla. Sin embargo, el uso de la PCR requiere saber qué clase de virus hay que buscar, y ello implica hacer conjeturas.

En septiembre del pasado año, un equipo de investigadores de la Universidad de Columbia describieron un nuevo método que prescindiría de suposiciones. La técnica, que tiene el desafortunado nombre de «plataforma de captura y secuenciación del viroma para virus de vertebrados» (o VirCapSeq-VERT), es capaz de identificar, con una precisión casi perfecta, todos los virus de una gota de saliva, tejido o líquido cefalorraquídeo. El método hace posible el análisis simultáneo de 21 muestras en menos de 48 horas con un coste estimado de tan solo 200 dólares por muestra. También puede detectar virus nuevos o mutados, siempre y cuando estos sean idénticos en al menos un 40 por ciento a los ya conocidos. «Cuando alguien va a urgencias y acaba siendo sometido a todo tipo de pruebas, eso cuesta miles de dólares», apunta W. Ian Lipkin, profesor John Snow de epidemiología en la Escuela Mailman de Salud Pública de la Universidad de Columbia. «Este método es muy barato y nos permite personalizar la medicina diciéndote exactamente lo que tienes.»

Para desarrollar la técnica, Lipkin y sus colegas crearon en primer lugar una base de datos de más de 1000 virus de vertebrados. Después sintetizaron sondas genéticas específicas para cada cepa de cada virus; en total, dos millones de hebras de ADN de 25 a 50 nanómetros de longitud. Cuando una sonda encuentra un virus complementario, se enlaza a él. Para su extracción, los operarios de laboratorio añaden perlas magnéticas que miden entre una y tres micras de diámetro; un conector químico une estas partículas con las sondas genéticas y los virus que han capturado. Los investigadores colocan entonces el tubo que contiene la mezcla en un soporte imantado, que atrae las sondas hacia las paredes del recipiente. Tras aislar y lavar los complejos sonda-partícula-virus, se determina la secuencia genética del virus para eliminar el riesgo de falsos positivos. Lipkin y sus colegas buscan ahora asociarse con proveedores comerciales que puedan distribuir la técnica a hospitales y clínicas de todo el mundo. Además, planean añadir sondas de todas las bacterias y hongos infecciosos conocidos.

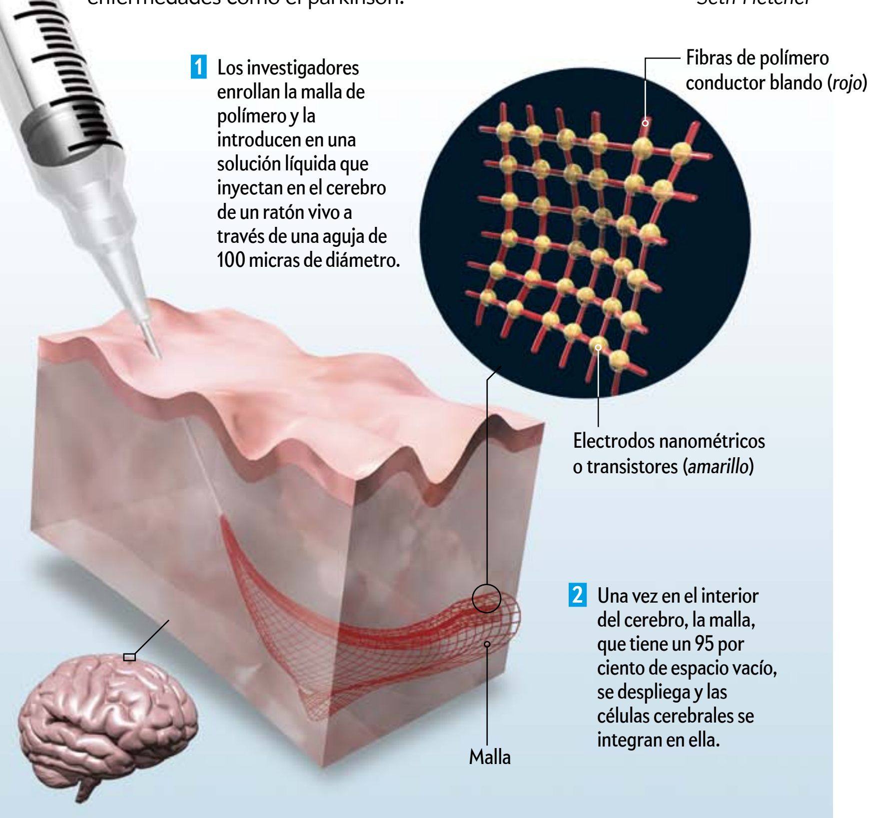
—Rachel Nuwer

Sondas electrónicas inyectables para el cerebro

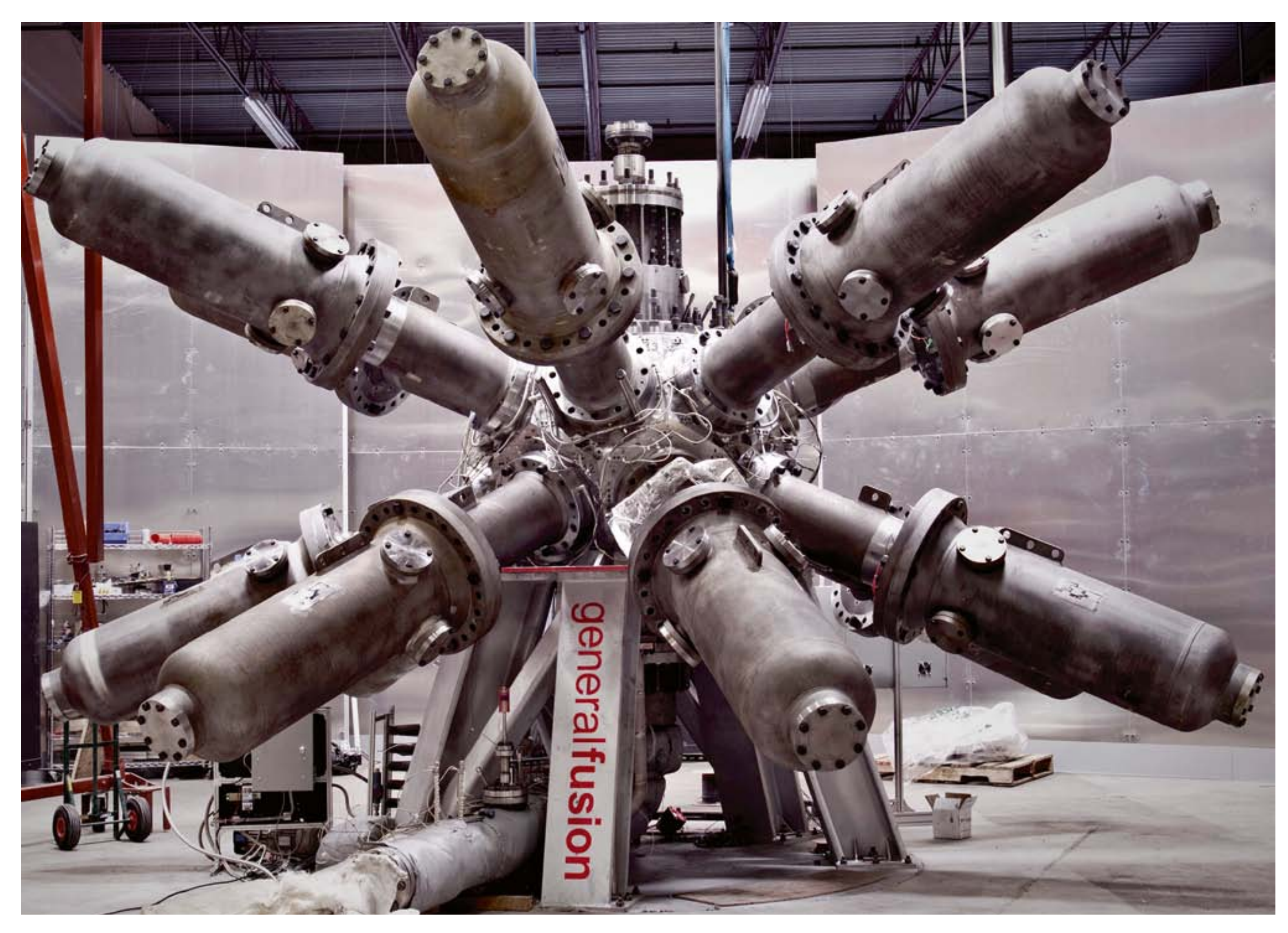
Una malla de polímero conductor podría ser de gran utilidad para las investigaciones en neurociencia

Para desentrañar los misterios del cerebro, los científicos necesitan monitorizar, de manera delicada y precisa, las neuronas en sujetos vivos. Sin embargo, las sondas cerebrales han sido, por lo general, instrumentos de fuerza bruta. Un equipo de la Universidad Harvard, liderado por el químico Charles Lieber, espera que esta situación cambie gracias a un implante compuesto por una malla sedosa de polímero blando. Este dispositivo flexible, que lleva incorporados sensores electrónicos, se ha ensayado por el momento en ratones vivos. Una vez se haya demostrado que la técnica es segura, podría usarse en personas para estudiar cómo surge la cognición a partir de la actividad de las neuronas individuales o para tratar enfermedades como el párkinson.

—Seth Fletcher



SCIENCE SOURCE (*virus*); DON FOLEY (*ilustración*)



PROTOTIPO del sistema de compresión del reactor de General Fusion. A escala completa, usará doscientos pistones para comprimir el plasma en una esfera central.

CORTESÍA DE GENERAL FUSION

Fusión a escala reducida

Tras muchos años de lento progreso e inversiones enormes, algunos investigadores de la energía de fusión están cambiando de táctica

Se puede acusar a los partidarios de la energía de fusión de ser demasiado optimistas, pero no de alicortos. La fusión se produce cuando dos elementos se combinan, o «fusionan», y forman un tercer elemento, con una conversión de materia en energía. Es el proceso que genera la energía del Sol; los principales proyectos mundiales de fusión son, por consiguiente, grandiosos. Pensemos en el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER) que un consorcio de siete naciones está construyendo en Francia. Este reactor tokamak, que cuesta 21.000 millones de dólares, creará con imanes superconductores un plasma tan caliente y denso como para lograr la fusión. Una vez terminado, pesará 23.000 toneladas, el triple que la torre Eiffel. La Instalación Nacional de Ignición (NIF), su principal competidor, no es menos compleja: dispara 192 láseres contra una cápsula de combustible hasta que alcanza temperaturas de 50 millones de grados y presiones de 150.000 millones de atmósferas.

Pese a todo ello, habrán de pasar décadas antes de que haya una central operativa de energía de fusión derivada de ITER o de NIF. Una nueva generación de investigadores persigue una estrategia distinta: empequeñecer la escala. Este año, la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Energía de Estados Unidos (ARPA-E) invirtió casi 30 millones de dólares en nueve proyectos de fusión asequible, más pequeños, a través de un programa denominado Aceleración del Ensamblaje y Calentamiento de Plasma de Bajo Coste (ALPHA). Un proyecto representativo, a cargo de la compañía radicada en Tustin (California) Magnetoinertial Fusion Technologies, es el que se propone «pellizcar» con una corriente eléctrica un plasma hasta comprimirlo tanto que se induzca la fusión. Este enfoque tiene su abolengo: en 1958 se usó en el Laboratorio Nacional de Los Álamos para crear la primera reacción sostenida de fusión en un laboratorio.

Empresas no relacionadas con ALPHA están trabajando también en proyectos de fusión de otros tipos. General Fusion, de la Columbia Británica, ha construido un dispositivo que, para inducir la fusión, emplea ondas de choque que se propagan por un metal líquido. TriAlpha Energy está construyendo un reactor de fusión por colisión de haces, un aparato de 23 metros de largo que dispara unas partículas cargadas contra otras. Y el gigante de la industria militar Lockheed Martin dice estar trabajando en un reactor de fusión magnético, del tamaño de un contenedor de carguero, que estaría a la venta en diez años.

El historial de la fusión mueve a tomarse estos proyectos con escepticismo. Pero si uno de ellos consiguiese aportar energía limpia y abundante sin dejar residuos radiactivos, remediaría males diversos, de la pobreza energética al calentamiento global, con una sola innovación. *—David Biello*

Interruptores para desactivar organismos modificados genéticamente

Un mecanismo de autodestrucción basado en la técnica CRISPR podría evitar el espionaje industrial y la contaminación ambiental


TAVIS COBURN

Un número incalculable de bacterias *Escherichia coli* modificadas genéticamente viven en tanques de todo el mundo, produciendo en masa todo tipo de sustancias útiles, como insulina, polímeros plásticos y aditivos alimentarios. Cuando los microorganismos reprogramados han cumplido su función, se desechan como residuo industrial o se reutilizan como abono.

En la actualidad, esa práctica supone un riesgo ambiental mínimo, pues las bacterias *E. coli* modificadas son débiles en comparación con sus primas salvajes, por lo que no sobrevivirían mucho tiempo fuera del laboratorio. Sin embargo, podría ocurrir que futuros microorganismos diseñados mediante ingeniería genética llegaran a sitios donde no son deseados y entrañaran algún peligro. ¿Y si, por ejemplo, un accidente liberara microbios más robustos que fueran capaces de invadir un ecosistema en equilibrio? ¿Y si bacterias manipuladas compartieran con sus homólogas en la naturaleza, mediante transferencia horizontal de genes, ciertas características como la resistencia a los antibióticos? ¿Y si una compañía rival robara una cepa patentada por los secretos codificados en su ADN? La comunidad científica ya está desarrollando mecanismos de seguridad para hacer frente a tales contingencias.

Se están desarrollando mecanismos de seguridad para evitar que ciertos microorganismos lleguen a sitios indeseados

En 2009, el bioingeniero Brian Caliando, a la sazón en la Universidad de California en San Francisco, empezó a trabajar en un método para garantizar que el ADN de un organismo modificado genéticamente pudiera autodestruirse antes de escapar o ser robado. Poco tiempo antes había leído sobre CRISPR, una táctica defensiva recientemente descubierta que las bacterias utilizan para cortar y destruir el ADN de virus invasores [*véase* «La edición genética, más precisa», por Margaret Knox; Investigación y Ciencia, febrero de 2015], y se dio cuenta de que podría integrarlo a modo de interruptor de emergencia para cepas obtenidas mediante manipulación genética.

Bajo la supervisión de Christopher Voigt, primero en la Universidad de California y luego en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Caliando desarrolló DNAi, un sistema basado en CRISPR que obliga a las células a cortar su propio ADN modificado. Usando CRISPR, Caliando programó plásmidos (pequeños fragmentos circulares de ADN que se replica de manera independiente) para que codificaran las bases de ARN y las enzimas que componen el mecanismo. A continuación, los introdujo en bacterias *E. coli* manipuladas, donde iniciaban y propagaban su letal programa. La adición de un azúcar llamado arabinosa al tanque activa el interruptor, y el sistema DNAi empieza a trocear el ADN modificado de las células.

El trabajo de Caliando, publicado el año pasado en *Nature Communications*, es una prueba de concepto. Los mismos principios podrían adaptarse para ser aplicados a diversas especies y condiciones. Sostiene que el DNAi evitaría, por ejemplo, que organismos modificados genéticamente produjeran polinizaciones cruzadas entre cultivos cercanos.

—Jennifer Abbasi



DON FOLEY

El aspirador térmico

Un espejo que absorbe el calor y lo proyecta hacia el espacio exterior facilitará la refrigeración de los edificios

El aire acondicionado es el responsable en Estados Unidos de casi el 15 por ciento del consumo de energía en edificios. El número de días en que haga un calor de récord seguramente aumentará mucho en los decenios venideros. Estos dos hechos plantean un problema difícil: en un mundo que se calienta, ¿cómo podremos enfriar nuestras casas y lugares de trabajo y al mismo tiempo reducir el consumo de energía?

Según unos investigadores de la Universidad Stanford, parte de la solución reside en un material que absorbe calor de los edificios bañados por el sol y lo irradia hacia el espacio exterior. La idea básica, que recibe el nombre de enfriamiento radiativo, nació en los años ochenta, cuando los ingenieros descubrieron que cierto tipo de tejados de metal pintado extraían calor de los edificios y lo irradiaban en longitudes de onda que atravesaban la atmósfera terrestre sin impedimentos. El enfriamiento radiativo no funcionaba nunca de día, sin embargo, ya que no se había creado un material que a la vez radiase energía térmica y reflejara la luz solar. El reflejo es fundamental: si un material absorbe la luz del sol, el calor solar anulará el enfriamiento que pueda conseguir la radiación térmica.

Para solventar el problema, lo que el equipo de Stanford creó viene a ser un espejo muy eficiente. El material, compuesto por capas de dióxido de hafnio y de dióxido de silicio sobre una base de plata, titanio y silicio, reflejaba el 97 por ciento de la luz solar en los ensayos que efectuaron en el tejado del laboratorio. Las moléculas de dióxido de silicio se comportan como minúsculas antenas que absorben el calor del aire en una cara del panel y emiten radiación térmica por la otra. El material radia sobre todo en las longitudes de onda que caen entre los ocho y los trece micrómetros. La atmósfera terrestre es transparente a esas longitudes de onda, así que el calor, en vez de calentar el aire que rodea al edificio, escapa al espacio. Aun expuesta directamente a la luz solar, la oblea de 20 centímetros de diámetro del grupo está unos cinco grados más fría que el aire.

Shanhui Fan, ingeniero eléctrico de Stanford y coautor, como director del grupo de investigación, de un artículo publicado en *Nature* en 2014 que describía el trabajo, imagina que paneles de ese material cubran los tejados de los edificios. Al expeler el tejado calor continuamente, el aire acondicionado de un edificio podría relajarse y consumir menos energía. Habría también otras aplicaciones. Si se elimina el componente de espejo y se empareja el material a células fotoeléctricas, las enfriará y sin embargo dejará que les llegue la luz; así serían más eficaces. «Es muy interesante pensar en formas de aprovechar el enorme recurso termodinámico que representa el universo en cuanto sumidero de calor», dice Fan. «En realidad, estamos solo en el principio mismo de reconocer que se cuenta con este recurso energético renovable aún inexplorado.»

—Rachel Nuwer

Máquinas que se enseñan a sí mismas

La tecnología del aprendizaje profundo contribuye a que la inteligencia artificial cumpla sus promesas

Google, Facebook y otros gigantes empresariales están dando grandes pasos hacia la construcción de dispositivos que aprendan por sí mismos. Se están inspirando, en muy buena medida, en el llamado «aprendizaje profundo» [*véase* «Máquinas capaces de aprender», por Nicola Jones; Mente y Cerebro n.º 70, 2015].

Basadas en la vieja idea de que los ordenadores serían más inteligentes si funcionasen de forma más parecida a como lo hace el cerebro humano, las redes de aprendizaje profundo se componen de capas de unidades conectadas de procesamiento informático, denominadas «neuronas artificiales», cada una de las cuales realiza una operación diferente sobre la entrada que haya recibido el sistema (una imagen, digamos, que hay que clasificar). La diferenia entre las redes neuronales ordinarias y las de aprendizaje profundo es que estas últimas tienen muchas más capas. Cuanto más profunda sea la red (más capas tenga), mayor será el nivel de abstracción en que pueda actuar.

El aprendizaje profundo tomó impulso a mediados de la década de 2000 gracias al trabajo de tres figuras clave: Geoffrey Hinton, de la Universidad de Toronto, Yoshua Bengio, de la Universidad de Montreal, y Yann LeCun, de la Universidad de Nueva York. Sin embargo, ha empezado a abrirse paso comercialmente solo hace poco. Un ejemplo corresponde a la aplicación Google Fotos. Puede subir todas las fotos de mi teléfono inteligente, identificar correctamente a mi esposa, mi hijo y mi nieto, y colocar sus fotografías en distintos cestos digitales etiquetados con imágenes en miniatura. Puede hacerlo porque ha aprendido a reconocer rostros después de haber estado expuesta a millones de imágenes analizadas por el sistema. A medida que hace pasar una imagen a través de cada capa sucesiva de su red, identifica elementos dentro de la imagen a un nivel creciente de abstracción, hasta que finalmente detecta la cara entera.

Una vez se ha entrenado con un número suficiente de caras, la aplicación puede dar con la nariz y la boca de individuos en imágenes que nunca antes ha visto.

El aprendizaje profundo puede hacer mucho más que organizar imágenes. De hecho, quizá suponga un paso hacia una inteligencia artificial que exhiba comportamientos casi indistinguibles de los de sus dueños humanos. En febrero del año pasado, un equipo de expertos en inteligencia artificial de la firma londinense DeepMind, que Google compró en 2014 por 617 millones de dólares, comunicó que había empleado el aprendizaje profundo para construir un ordenador que podía enseñarse a sí mismo a jugar a docenas de videojuegos de Atari. Tras mucha práctica, batía en la mitad de esos juegos a jugadores humanos expertos. Un pequeño paso, pero la era de las máquinas ha de empezar por alguna parte.

—*Gary Stix*



Reacciones químicas a cámara lenta

La espectroscopía infrarroja y las simulaciones por ordenador arrojan luz sobre las interacciones entre soluto y disolvente

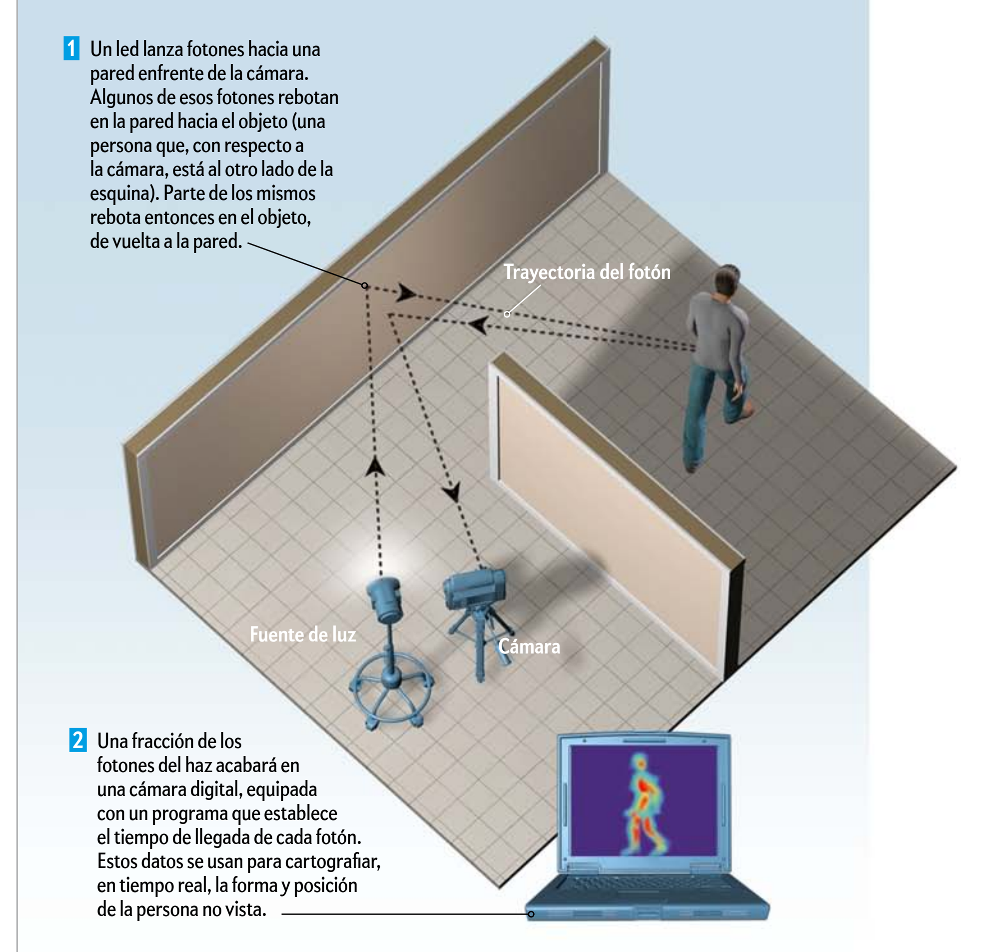
Los puentes de hidrógeno que mantienen unidos los pares de bases moleculares de nuestro ADN se forman en el fluido intracelular. Gran parte de la química ambiental de nuestro planeta ocurre en océanos y otras masas de agua. Y en la síntesis de la mayoría de los fármacos se utilizan disolventes. Sin embargo, los químicos suelen estudiar la mecánica de las reacciones, enlace por enlace, solo en fase gaseosa, donde las moléculas se encuentran dispersas y es fácil seguir su rastro. En un líquido existe un número mayor de moléculas y se producen más colisiones entre ellas, de modo que las reacciones son rápidas, caóticas y complejas. El proceso que se desee observar se verá como un borrón indiferenciado, a menos, claro está, que uno pueda hacer fotos de la reacción en pocas billonésimas de segundo.

Andrew Orr-Ewing, de la Universidad de Bristol, utiliza láseres para estudiar la reactividad química. Sabía que las reacciones catalizadas por calor que se producen en un medio líquido generan vibraciones que pueden observarse en el espectro infrarrojo. En diversos experimentos llevados a cabo entre 2012 y 2014, Orr-Ewing y su entonces alumno de doctorado Greg Dunning irradiaron con un pulso de luz ultravioleta ultracorto una solución de difluoruro de xenón en un disolvente llamado acetonitrilo. El láser actuó como un escalpelo, sacando átomos de flúor altamente reactivos que, a su vez, arrancaron átomos de deuterio del disolvente para formar fluoruro de deuterio. La velocidad a la que aparecían y se desvanecían las delatoras vibraciones infrarrojas tras el primer pulso láser (observadas mediante espectroscopia infrarroja, una técnica estándar) indicaba lo rápido que se establecían los enlaces entre átomos y lo rápido que la reacción alcanzaba el equilibrio.

Esos experimentos sirvieron como prueba de concepto para apreciar detalles con una resolución temporal de picosegundos en las reacciones en fase líquida. Sin embargo, para investigar y optimizar reacciones químicas, los expertos no suelen emplear láseres y detectores caros, sino que recurren a simulaciones por ordenador. Para ese fin, los colegas de Orr-Ewing en Bristol, David Glowacki y Jeremy Harvey, han escrito un programa de simulación capaz de predecir los resultados de la espectroscopía con un extraordinario nivel de exactitud. «Podemos usar estas simulaciones para ahondar en lo que está ocurriendo», apunta Orr-Ewing, «porque nos dan información más precisa que la que podemos obtener de los ensayos de laboratorio».

Combinados, los experimentos y las simulaciones proporcionan la mejor visión disponible hasta ahora del modo en que ocurre una reacción química en fase líquida. Ya están empezando a incorporarse los métodos de este equipo en programas de simulación por ordenador para uso industrial y académico, lo que podría beneficiar a científicos que estén investigando enfermedades, desarrollando medicamentos o realizando estudios ecológicos.

—Jennifer Abbasi



DON FOLEY

Ver alrededor de la esquina

Gracias a fotones que rebotan, las cámaras ven más allá de la visual

Si las cámaras viesen alrededor de las esquinas, podrían avisar a los conductores de un peligro que les esperase más allá de una curva, ayudar a los bomberos a buscar en edificios en llamas y permitir a los cirujanos la observación de zonas difíciles de alcanzar en el cuerpo. Hace unos años, unos investigadores del Media Lab del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) concibieron la manera de construir una cámara así, pero se trataba de un caro prototipo, inmaduro aún. Con un pulso de láser, se hacía que rebotase luz en una pared o puerta hacia un objeto estacionario situado en la habitación contigua. Una cámara que costaba medio millón de dólares recibía entonces la luz que rebotaba de vuelta, y unos programas registraban el tiempo de llegada de los fotones individuales, calculaba distancias y reconstruía el objeto no visto. Desde entonces, el equipo del MIT ha mejorado la técnica considerablemente. Ahora pueden tomar imágenes de objetos que se mueven más allá de la visual y, en vez de un láser y una cámara de medio millón de dólares, les basta con un led y un sensor Microsoft Kinect que cuesta cien dólares.

—Larry Greenemeier

SALUD

EL GEN DE LA OBESIDAD

Una mutación genética en nuestros antepasados primates puede ser la causa de la actual pandemia de obesidad y diabetes

Richard J. Johnson y Peter Andrews

En 1962, el genetista James Neel propuso una hipótesis para resolver un rompecabezas evolutivo desconcertante. Lo que se conoce hoy como diabetes de tipo 2 provoca, a su vez, diferentes síntomas debilitantes, como ceguera, cardiopatías e insuficiencia renal. En el pasado, cuando no se disponía de tratamientos adecuados, los humanos con estos síntomas tendrían menos éxito a la hora de encontrar pareja, reproducirse y transmitir a las generaciones futuras el gen causante de la enfermedad. Es decir, la selección natural debería haber eliminado este gen y, por tanto, la dolencia.

Sin embargo, el trastorno se mantuvo y fue aumentando en la población. Neel se preguntaba cómo pudieron sobrevivir las personas portadoras de un gen tan perjudicial. Y por qué la diabetes, que se caracteriza por unos niveles anormalmente altos de glucosa en la sangre, resultaba cada vez más frecuente.

Neel dedicó una gran parte de su tiempo a estudiar poblaciones indígenas como los yanomamis del Amazonas. Supuestamente, en su acervo génico hay la misma variante genética de la diabetes que presentan otros humanos actuales, aunque ellos casi nunca padecen esta enfermedad ni tampoco obesidad. El contraste entre las personas indígenas y las de sociedades desarrolladas le proporcionó una pista. Según él, en el pasado remoto habría más fases en las que los alimentos escaseaban, lo que causaría hambrunas o incluso una carestía generalizada. Los portadores de una variante genética que hiciera más eficaz la asimilación o utilización de los alimentos habrían podido extraer más calorías y almacenarlas en forma de grasa. Los dotados con ese gen «ahorrador» contarían con una grasa extra que habría supuesto una ventaja para sobrevivir en tiempos de necesidad. Sin embargo, en tiempos de abundancia, como en la actualidad, el mismo rasgo daría lugar a una ganancia excesiva de peso y a la diabetes.

Aunque la hipótesis del gen ahorrador ha recibido algunas críticas, se ha mantenido vigente de una forma u otra desde hace medio siglo. La idea de que nuestro organismo está programado genéticamente para almacenar la grasa, y de que nuestra dieta rica y hábitos sedentarios han desbordado esta programación, ha impulsado numerosas investigaciones que intentan identificar los posibles genes ahorradores causantes de la diabetes y otras enfermedades relacionadas con la obesidad, como la hipertensión arterial, la esteatohepatitis no alcohólica y las cardiopatías. Pero algunos científicos critican esta hipótesis y argumentan que, en el pasado, los períodos de hambre habrían sido demasiado escasos y cortos como para que se seleccionaran genes que favorecieran la acumulación de grasa; además, tampoco se ha logrado identificar los genes ahorradores.

Pero, en tiempo reciente, los dos autores de este artículo han analizado en profundidad nuestro pasado evolutivo y han hallado pruebas sólidas que confirman una parte esencial de la hipótesis de Neel, a saber, que la mutación de un gen convirtió a los humanos en ahorradores de calorías. Tal mutación surgió en antiguos simios hace millones de años y creemos que les permitió sobrevivir durante largos períodos de carencia. Si estamos en lo cierto, nuestra hipótesis podría ayudar a revelar cómo evolucionaron esos simios y dieron lugar a nuestros primeros ancestros; y permitiría identificar el gen responsable de muchas de las principales enfermedades actuales.

REGRESO A ÁFRICA

Al principio, Neel y otros científicos suponían que el gen ahorrador apareció cuando nuestros antepasados habitaban las llanuras del este de África. Pero según nuestra interpretación, la historia comienza mucho antes, cuando los simios hacía poco que medraban en nuestro planeta. En nuestro relato hay cambios climáticos globales, hambre y lucha por la supervivencia.

Los primeros simios evolucionaron hace unos 26 millones de años, probablemente en el este de África, a partir de un ancestro común suyo y del resto de primates. Esos simios, el más conocido de los cuales es *Proconsul*, eran cuadrúpedos y arborícolas, de forma similar al resto de los monos, pero poseían un cuerpo grande, sin cola, y un cráneo y un cerebro más voluminosos. En esa época, África era un edén tropical formado por bosques caducifolios y pluvisilva donde los simios se alimentaban principalmente de fruta. Allí prosperaron y se diversificaron hasta existir 14 especies, según se ha identificado en el registro fósil.

TIM BOWER



Pero el mundo se fue enfriando gradualmente. Los casquetes polares se expandieron y el nivel del mar descendió. Hace 21 millones de años, África, que había sido un continente insular como lo son hoy Australia y la Antártida, se conectó a Eurasia a través del primero de una serie de puentes de tierra. Gracias a las excavaciones realizadas por uno de nosotros (Andrews) y otros científicos en Turquía, Alemania y España, sabemos que jirafas, elefantes, antílopes e incluso cerdos hormigueros emigraron de África a Eurasia. Y entre esos animales había también simios. Hace unos 16,5 millones de años, simios como *Griphopithecus* y *Kenyapithecus* vivían en un yacimiento cerca del actual pueblo turco de Paşalar.

Cuando los simios llegaron a Europa se encontraron con bosques perennes subtropicales y bosques húmedos de frondosas en los que abundaba la fruta, lo que les permitió prosperar al principio. Se diversificaron en al menos ocho especies correspondientes a cinco géneros, como *Dryopithecus* y *Ankarapithecus*. Andrews y su equipo, tras estudiar sedimentos de 16,5 millones de años cerca de Paşalar, llegaron a la conclusión de que, en ese tiempo, el clima estacional se asemejaba al que hay hoy en el norte de la India, con lluvias monzónicas en verano seguidas de períodos largos y secos e inviernos frescos sin heladas.

A medida que el planeta se fue enfriando y el clima se volvió más seco, el bosque dio paso a las sabanas, y la fruta empezó a escasear durante los meses de invierno. Gracias a las excavaciones realizadas en los años ochenta y noventa del siglo xx, Andrews halló indicios de que los simios de entonces vivían sobre todo en el suelo, no en los árboles, lo que les habría proporcionado mayor capacidad para desplazarse y buscar alimentos. Los estudios sobre el desgaste de dientes fósiles y el engrosamiento de su esmalte indican que estos animales hambrientos habrían empezado a consumir otros recursos, como tubérculos y raíces.

En cierto momento, los simios europeos empezaron a pasar hambre durante el invierno. En Paşalar, Andrews y Jay Kelley, de la Universidad estatal de Arizona, han hallado fósiles de individuos adultos jóvenes de *Kenyapithecus kizili* cuyos incisivos presentan estrías que revelan períodos intermitentes de hambruna. Otros paleontólogos han descubierto que el simio *Dryopithecus*, que vivió hace entre 9 y 12 millones de años en la cuenca del Vallés-Penedés, en Cataluña, mostraba también estas estrías en los dientes. Conforme pasaba el tiempo, el clima se iba enfriando cada vez más hasta que, hace unos siete millones de años, los simios desaparecieron de Europa.

O, al menos, eso parecía. Ahora el registro fósil señala que algunos simios europeos se desplazaron a Asia y se convirtieron en los ancestros de los gibones y los orangutanes, mientras que otros regresaron a África y evolucionaron para dar lugar a los simios africanos y a los humanos. Tal vez uno de los que migraron de Eurasia a África fue *K. kizili*, que poseía dientes y mandíbulas similares a los de *Kenyapithecus wickeri*, un simio que vivió en el este de África dos millones de años más tarde.

Los datos genéticos corroboran las pruebas fósiles de que Europa atravesó tiempos difíciles, y ambos conjuntos de datos han llevado a los autores a replantear la hipótesis del gen ahorrador de un modo distinto. Se han centrado en un gen que, en numerosos animales, da lugar a una enzima llamada uricasa. Sin embargo, en todos los grandes simios (gorilas, orangutanes, chimpancés y bonobos) y en los humanos actuales, tal gen ha mutado y no producimos uricasa. Ambos poseemos la misma forma mutante del gen, lo que indica que nuestra especie lo ha heredado de un antepasado común nuestro y de los grandes simios. Al analizar los cambios del gen a lo largo de la evolución con un método conocido como reloj molecular, Naoyuki Takahata, de la Universidad de Estudios Avanzados en Hayama, y sus colaboradores y Eric Gaucher, del Instituto de Tecnología de Georgia, han determinado por separado que el ancestro común de los grandes simios y los humanos vivió hace entre 13 y 17 millones de años. Ese período de tiempo coincide con la época en la que los simios europeos se esforzaban por superar las hambrunas estacionales.

Una mutación diferente desactivó el gen de la uricasa en los ancestros de los simios menores (los gibones), que probablemente vivían en Europa en la misma época. En conjunto, estos hallazgos hacen pensar que la inhibición de la uricasa ayudó a los antiguos simios europeos a sobrevivir ante la escasez de alimentos. Pero ¿de qué forma los ayudó?

Richard J. Johnson es profesor de medicina en el campus de medicina Anschutz de la Universidad de Colorado, en Aurora. Su investigación se centra en las causas de la obesidad, la diabetes, la hipertensión y la enfermedad renal.

Peter Andrews es investigador del Museo de Historia Natural de Londres y profesor del departamento de antropología del Colegio Universitario de Londres. Fue uno de los primeros en proponer que los antepasados de los grandes simios y los humanos actuales evolucionaron fuera de África.

BUENOS Y MALOS TIEMPOS

Una pista de cómo la deficiencia de uricasa habría permitido superar las hambrunas la ofreció una línea de investigación distinta que estudia las causas de la hipertensión arterial y las cardiopatías. En la mayoría de los animales, la enzima descompone el ácido úrico, un producto de desecho que se produce cuando algunos alimentos son metabolizados. Una mutación antigua en los grandes simios habría inhibido la enzima y habría provocado la acumulación del ácido úrico en la sangre.

De entrada podría pensarse que tal cambio resultaría perjudicial, ya que el exceso de ácido úrico puede precipitar y formar cristales en las articulaciones (lo que da lugar a gota) o en los riñones (lo que produce piedras renales). Sin embargo, en condiciones normales, los humanos y los simios pueden excretar ácido úrico a través de la orina con la suficiente rapidez como para que la mutación solo provoque un aumento moderado en la

EN SÍNTESIS

Hace unos 16 millones de años, los simios prosperaron en Europa, por entonces de clima subtropical. Pero el enfriamiento global posterior hizo escasear los recursos de los que se alimentaban.

La mutación de un gen que codifica la uricasa ayudó a convertir el azúcar de la fruta (fructosa) en grasa, lo que permitió a los simios europeos sobrevivir a las hambrunas.

La persistencia del gen mutado en todos los grandes simios y humanos actuales, además de las pruebas fósiles, señalan que ambos descienden de esos simios europeos.

La mutación predispone a los humanos actuales a la obesidad y a la diabetes. Para prevenir esas enfermedades deberíamos consumir menos fructosa.

sangre. De hecho, los simios africanos actuales presentan niveles de ácido úrico solo ligeramente más altos que otros animales, al igual que los indígenas que han conservado su antigua forma de vida, como los yanomamis.

En cambio, en las sociedades que siguen la dieta occidental y mantienen hábitos sedentarios, los valores medios de ácido úrico se han disparado. Los médicos saben también que las personas obesas o con cardiopatías suelen presentar concentraciones sanguíneas más altas de ácido úrico, además de colesterol y triglicéridos, que las personas delgadas y en buena forma física.

Los autores del influyente Estudio del Corazón de Framingham han realizado un seguimiento de pacientes durante décadas y han utilizado la estadística para identificar qué sustancias causan cardiopatías. En 1999, señalaron que un nivel alto de ácido úrico no provocaba por sí solo enfermedades. En cambio, propusieron que la hipertensión aumentaba el riesgo de cardiopatías, y también hacía elevar los valores de ácido úrico.

Sin embargo, esa idea incomodaba a uno de nosotros (Johnson), porque los autores habían violado un principio básico en biología: habían presentado su conclusión sin demostrar la hipótesis en animales de laboratorio. Marilda Mazzali, médica que trabaja con Johnson, procedió a realizar un ensayo de este tipo. Algunos años antes, el equipo de Johnson había demostrado que pequeñas lesiones en los riñones de las ratas podrían causarles hipertensión. Mazzali les administró un medicamento que inhibía la uricasa y aumentaba los niveles de ácido úrico para ver si ello elevaba la presión arterial o alteraba la función renal. En experimentos anteriores habíamos observado que los valores altos de ácido úrico no causaban ningún daño en el riñón, por lo que predijimos que probablemente el fármaco no afectaría la presión arterial o los riñones. Pero Mazzali nos sorprendió cuando ella misma nos informó de que las ratas sufrían hipertensión.

Johnson y sus colaboradores realizaron más tarde una serie de estudios en los que demostraron que la elevación del ácido úrico en las ratas causaba hipertensión a través de dos mecanismos. Primero el compuesto actúa con rapidez y da lugar a una serie de reacciones bioquímicas, denominadas en conjunto estrés oxidativo, que constriñen los vasos sanguíneos y obligan al corazón a bombear con más fuerza para hacer circular la sangre, lo cual aumenta la presión arterial. Si el ácido úrico disminuye, tal efecto se invierte. Pero si se mantiene alto puede provocar pequeñas lesiones duraderas e inflamación en los riñones, que excretan sal con menor eficacia. Ello, a su vez, aumenta la presión arterial, la cual podrá corregirse con una dieta pobre en sal pero no mediante un descenso del ácido úrico.

Para comprobar si los humanos respondían de la misma manera al aumento del ácido úrico, Johnson y Dan Feig, nefrólogo pediátrico entonces en el Colegio Baylor de Medicina, midieron el ácido úrico de adolescentes obesos recién diagnosticados con hipertensión y descubrieron con sorpresa que el 90 por ciento de ellos presentaba valores altos del compuesto. Entonces, realizaron un ensayo clínico en el que trataron a 30 de estos pacientes con alopurinol, un fármaco que disminuye la concentración de ácido úrico. Lograron restablecer la presión arterial normal en el 85 por ciento de los pacientes cuyo nivel de ácido úrico se había reducido de forma importante. Los resultados, publicados por Johnson y Feig en el *Journal of the American Medical Association* en 2008, han sido replicados en otros estudios piloto. No obstante, se necesita llevar a cabo un amplio ensayo clínico antes de poder asegurar que la reducción del ácido úrico con un fármaco permite atenuar una hipertensión recién diagnosticada.

UN FESTÍN SIN FIN

Dado que la hipertensión arterial suele asociarse a la obesidad y a la inactividad, Johnson se planteó si el ácido úrico no solo daba lugar a hipertensión, sino también a obesidad por sí sola. Al reflexionar sobre esta cuestión, adoptó una perspectiva amplia. Pensó en la forma en que nuestros antepasados evolutivos, desde los roedores hasta los simios, habían ajustado su metabolismo mientras atravesaban épocas de abundancia y de carestía.

Cuando en la naturaleza sobreviene una fase prolongada de escasez de alimentos, existe una regla general según la cual sobrevive el más gordo. Los mamíferos aumentan sus reservas de grasa para superar la hibernación, las aves engordan para soportar una larga migración y el pingüino emperador gana unos kilos para anidar durante el duro invierno. Cuando estos animales sienten que se acercan tiempos difíciles, se ven forzados a buscar alimento, a comer y a engordar.

En esos momentos, las aves y los mamíferos también adoptan de forma natural un estado prediabético. Normalmente, cuando el cuerpo digiere los carbohidratos, se forma glucosa que se acumula en el torrente sanguíneo. El páncreas reacciona mediante la secreción de insulina, lo que indica al hígado y a los músculos que conviertan la glucosa en glucógeno, una molécula que actúa como reserva energética. Pero cuando la comida escasea, los animales deben seguir buscando alimento para sobrevivir, y su cerebro requiere un suministro constante de glucosa para hacerlo. Por esta razón, todos los animales hambrientos, desde las ardillas hasta las currucas, sufren un cambio metabólico que hace que las células del cuerpo ignoren las indicaciones de la insulina. Esta «resistencia a la insulina» mantiene un cierto nivel de glucosa en la sangre para abastecer el cerebro.

Johnson y otros se dieron cuenta de que debía de haber algún mecanismo que alertara al organismo para que engordara y se convirtiera en prediabético. Decidieron denominarlo «interruptor de la grasa». Dado que las aves, los osos y los orangutanes se atiborran de frutos para almacenar grasa de cara a los momentos de escasez, sospechaba que el azúcar de la fruta (la fructosa) tal vez activaba el interruptor. Los experimentos en ratones realizados por Takuji Ishimoto y Miguel Lanaspa, ambos entonces en el laboratorio de Johnson, demostraron que así era. Los múridos con una dieta rica en fructosa comían más, se movían menos y tendían a acumular más grasa que los que seguían una dieta más saludable. En parte, esta acumulación se produce porque la fructosa inhibe la señal de la hormona leptina, que indica al cerebro que es hora de dejar de comer.

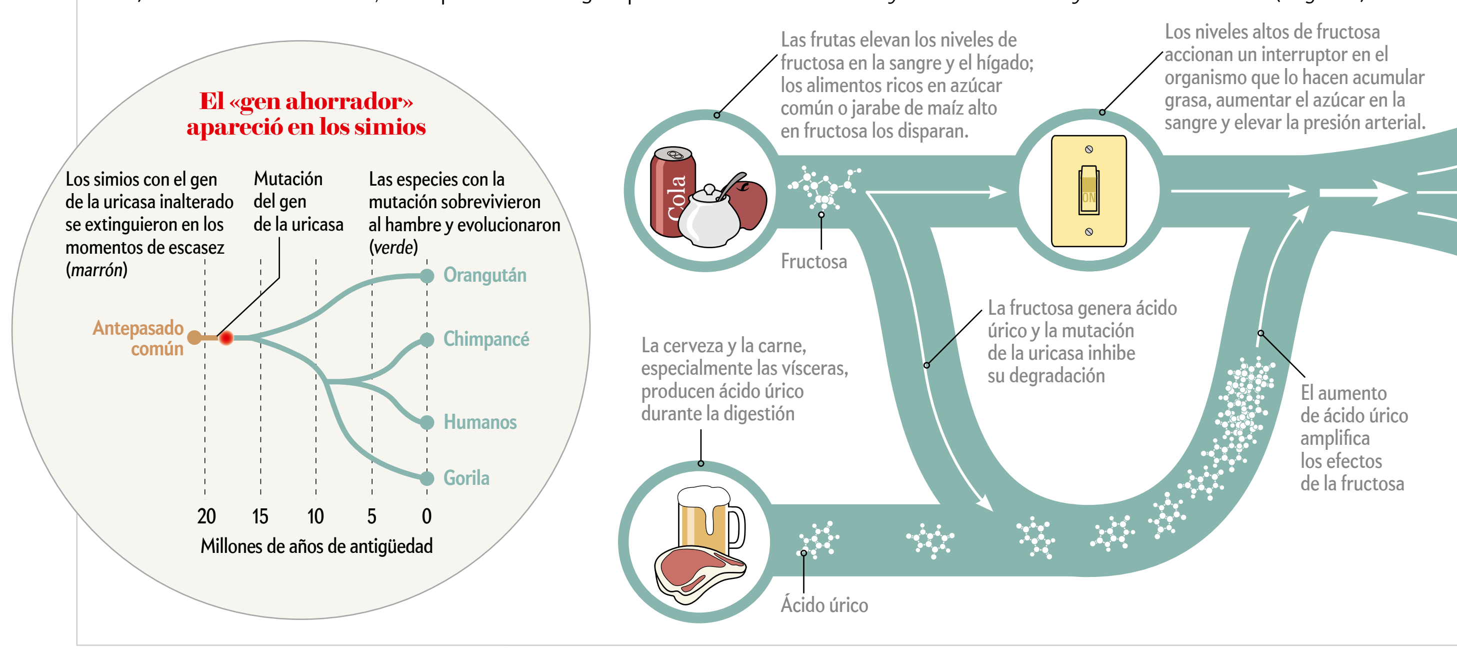
La fructosa, a diferencia de otros glúcidos, produce ácido úrico cuando se descompone dentro de las células, por lo que Johnson se preguntó si el ácido úrico mediaría también en los efectos de la fructosa. Para averiguarlo, Takahiko Nakagawa, entonces en el equipo de Johnson, ofreció a ratas una dieta rica en fructosa y a la mitad de ellas les administró alopurinol para rebajar el ácido úrico. El fármaco redujo la presión arterial de los múridos, lo que confirmaba los resultados anteriores del grupo. Al mismo tiempo, anuló muchos de los síntomas del denominado síndrome metabólico, que se caracteriza por unos bajos niveles de HDL (el colesterol «bueno»), hiperglucemia, triglicéridos elevados, exceso de grasa en el vientre e hipertensión. Además, en otro estudio realizado con células hepáticas humanas cultivadas en el laboratorio, se observó que la reducción de ácido úrico podía impedir que las células convirtiesen la fructosa en grasa.

Se iba forjando una imagen cada vez más clara. Una dieta rica en fructosa activa el interruptor de la grasa, y la ausencia de uricasa en los grandes simios y los humanos eleva la concen-

HIPÓTESIS

Una mutación que favorece la acumulación de grasas

Los autores proponen que una mutación genética en una especie de simio hace millones de años ayudó a esos animales a soportar las hambrunas, mientras que otros simios se extinguieron. Los que sobrevivieron transfirieron la mutación a especies posteriores, las cuales se diversificaron y dieron lugar a los humanos (*árbol genealógico inferior*). La mutación en cuestión, correspondiente a un gen que codifica la enzima uricasa, favoreció la supervivencia durante la escasez de alimentos porque, entre otros efectos, hizo que el organismo se volviera «ahorrador» con la comida, ya que almacenaba parte de las calorías de los alimentos en forma de grasa en lugar de obtener energía para su uso inmediato. Pero hoy que la comida abunda, la mutación tal vez esté contribuyendo a la obesidad y otras enfermedades (*diagrama*).



tración de ácido úrico, que a su vez incrementa los efectos de la fructosa. Esta combinación de circunstancias lleva en última instancia a sufrir el síndrome metabólico, que aumenta el riesgo de cardiopatías, accidentes cerebrovasculares y diabetes.

CAMBIO DURADERO

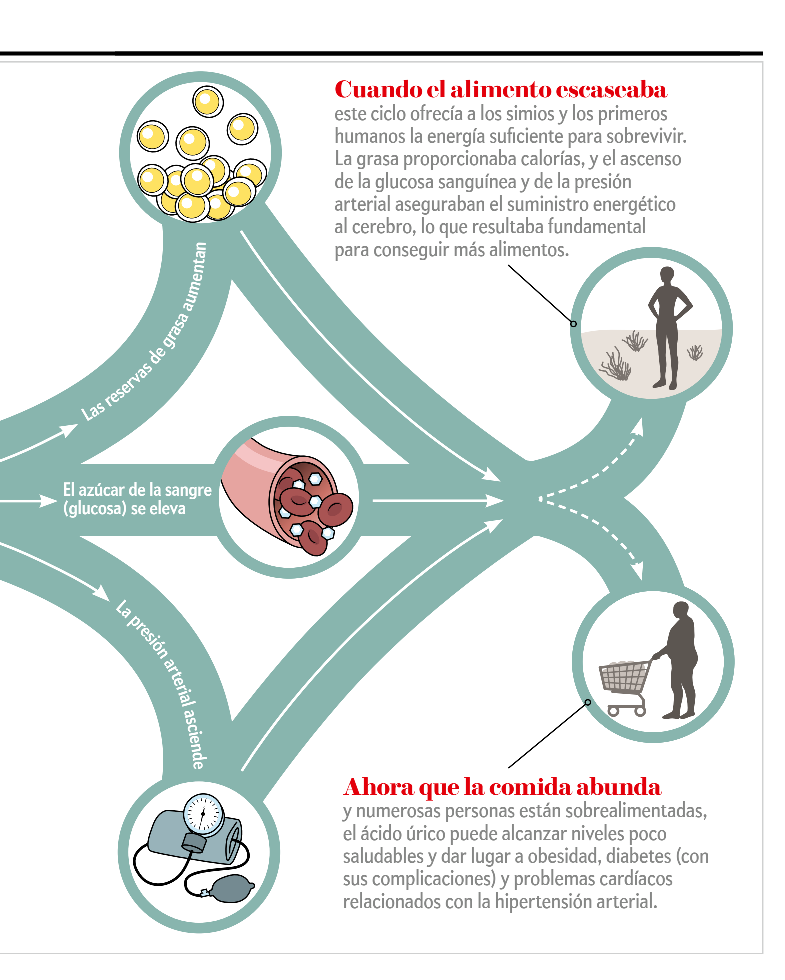
En junio de 2008, cuando se estaba concibiendo esa imagen, Johnson visitó a Andrews en el Museo de Historia Natural de Londres, donde el segundo dirigía investigaciones sobre la evolución humana y de los primates. Durante algunas horas imaginaron cómo una mutación del gen de la uricasa habría provocado la carencia de esta enzima, lo cual habría ayudado a los simios hoy extintos a sobrevivir cuando el clima global se enfrió. Johnson sugirió que la ausencia de uricasa y la consiguiente elevación del ácido úrico propiciarían la conversión de la fruta en grasa, con lo que los animales soportarían mejor los inviernos cuando, a mediados del Mioceno, hace 15 millones de años, se volvieron más fríos y secos. Andrews aportó una idea importante. Aunque África se estaba enfriando, seguía siendo lo suficientemente cálida como para acoger extensos bosques de ficus tropicales (grupo de plantas en el que se incluye la higuera), que producen frutos durante todo el año. De este modo, los simios africanos dispondrían de alimentos todo el tiempo, como les sucede hoy a los chimpancés, gorilas y orangutanes. Pero en Europa, a medida que el clima subtropical se volvía templado, estos árboles empezaron a escasear y dejaron de fructificar en invierno. Como consecuencia, los monos europeos empezaron a pasar hambre.

Los autores propusieron la hipótesis de que una mutación habría desactivado la uricasa y habría permitido a los simios europeos convertir la fructosa en grasa para poder afrontar los momentos de vacas flacas. Unos pocos millones de años más tarde, los descendientes de estos simios habrían regresado a África y, al llevar la mutación, se hallarían mejor preparados que los simios africanos para soportar las posibles hambrunas. Si los simios europeos sobrevivieron mejor y desplazaron a los africanos, muy probablemente sean los ancestros de los humanos y simios africanos de hoy en día. Y el gen mutado que desactiva la uricasa correspondería al «gen ahorrador» que tanto había buscado James Neel.

PREGUNTAS ABIERTAS

A pesar de las numerosas pruebas que tanto los autores como otros han reunido, la hipótesis de que el gen que anula la uricasa constituye un gen ahorrador todavía no se ha demostrado. Algunos investigadores han buscado de forma exhaustiva los genes ahorradores mediante el examen de polimorfismos genéticos humanos (variantes de genes) que pudieran ser responsables de la epidemia de obesidad y diabetes. Han identificado algunos que predisponen a las personas a estas enfermedades, pero ninguno que pueda explicar la epidemia. Sin embargo, la búsqueda de polimorfismos pasaría por alto el gen desactivado de la uricasa, ya que este no varía; todos los humanos lo poseemos igual. Los escépticos han alegado también que un gen ahorrador solo habría prosperado si la gordura hubiese supuesto una ventaja para los antepasados de los humanos. Pero la inhibición de la uricasa surgió hace millones de años para ayudar a nuestros ascendentes simios a no morir de hambre, no para hacerlos obesos.

FUENTE: «EVOLUTIONARY HISTORY AND METABOLIC INSIGHTS OF ANCIENT MAMMALIAN URICASES», POR JAMES T. KRATZER ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 111, N.º 10; 11 DE MARZO DE 2014 (*orden de eventos*); AMANDA MONTAÑEZ (*ilustración*)



Y otros plantean que si todos contáramos con el gen ahorrador, la obesidad se hallaría aún más extendida en la población. Sin embargo, según los estudios de Johnson sobre la dieta de los grandes simios y los yanomamis, la falta de uricasa por sí misma solo aumenta ligeramente los niveles de ácido úrico en la sangre. En lugar de ello, los autores proponen que el gen hace subir los valores de ácido úrico en respuesta a dos tipos de alimentos de la dieta occidental: los que producen ácido úrico, como la cerveza, y los que contienen o producen una gran cantidad de fructosa. Entre estos últimos se incluyen la miel y los alimentos procesados ricos en azúcar común o en jarabe de maíz alto en fructosa (ambos contienen glucosa y fructosa). Y cuando los niveles de ácido úrico se elevan, nos volvemos mucho más propensos a sufrir obesidad y diabetes.

En el año 2014, Gaucher, James T. Kratzer, a la sazón en el equipo de Gaucher, y Lanaspa, del grupo de Johnson, dieron a conocer algunas de las pruebas experimentales más sólidas hasta el momento que apuntaban al gen mutante de la uricasa como un gen ahorrador. Después de deducir la secuencia de ADN de los genes de la uricasa de primates extintos, de mamíferos como cerdos, ratas y perros, y de sus antepasados comunes, modificaron células hepáticas humanas para que produjesen las enzimas correspondientes. En 2014, publicaron un artículo en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* donde señalaban que, a medida que los simios ancestrales evolucionaron, las antiguas uricasas se volvieron cada vez menos activas hasta quedar totalmente anuladas en el antepasado común de los humanos y los grandes simios. Este cambio les habría permitido almacenar grasa y suministrar glucosa al cerebro con mayor eficacia, lo que les habría dado una mayor ventaja para sobrevivir cuando la comida escaseaba.

No obstante, la demostración definitiva de la hipótesis vendrá de experimentos que reduzcan el ácido úrico en humanos. Algunos estudios preliminares han revelado que la disminución de este compuesto con un fármaco contra la gota puede rebajar la presión arterial, mitigar la resistencia a la insulina, atrasar las enfermedades renales y evitar la ganancia de peso. Pero se necesitan ensayos más extensos para demostrar que la uricasa mutante corresponde en realidad a un gen ahorrador.

CONSUMIR MENOS AZÚCAR

Si se confirma esa idea, entonces la prevención de la obesidad, la diabetes y las cardiopatías tal vez exija reducir los valores altos de ácido úrico, además de los de colesterol o triglicéridos. Yendo más allá, incluso podrían utilizarse nuevos métodos de edición genética para recuperar la funcionalidad de la uricasa humana, de modo que el ácido úrico se eliminara con mayor eficacia, en lugar de simplemente excretarlo.

Hasta que llegue ese momento, deberíamos intentar mantener el peso y evitar las enfermedades mediante el ejercicio físico y la adopción de una dieta saludable. En las últimas décadas, al añadir a los alimentos procesados cada vez más azúcar y jarabe de maíz alto en fructosa, la obesidad y la diabetes se han extendido y la concentración media de ácido úrico en nuestra sangre ha aumentado. Si redujéramos la ingesta de fructosa y volviéramos a obtenerla de la fruta fresca, evitaríamos numerosas enfermedades. Por esta razón, la Asociación Americana del Corazón, tras ponderar estos avances científicos, ha recomendado rebajar el consumo de azúcar a seis cucharaditas al día en las mujeres y a nueve en los hombres.

Cinco décadas después del trabajo pionero de Neel, conocemos ahora la identidad de al menos uno de sus genes ahorradores, que podría ser uno de los causantes de las epidemias actuales de obesidad y diabetes. El ahorro es de hecho una virtud, pero cuando se trata del metabolismo, el exceso tampoco es bueno.

PARA SABER MÁS

Fructose, uricase, and the back-to-Africa hypothesis. Richard J. Johnson y Peter Andrews en *Evolutionary Anthropology*, vol. 19, n.º 6, págs. 250-257; noviembre/diciembre de 2010.

The fat switch. Richard J. Johnson. Mercola.com, 2012.

Evolutionary history and metabolic insights of ancient mammalian uricases. James T. Kratzer et al. en *Proceedings of the National Academy of the Sciences USA*, vol. 111, n.º 10, págs. 3763-3768; 11 de marzo de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La obesidad. W. Wayt Gibbs en *IyC*, octubre de 1996.

Combatir la obesidad. David H. Freedman en *IyC*, abril de 2011.

Genes de peso. Johannes Hebebrand y Stefanie Reinberger en *MyC* n.º 57, 2012.



ASTRONOMÍA

LA GUERRA DE LOS TELESCOPIOS



ALEX NABAUM

La rivalidad entre tres equipos de astrónomos ha amenazado la supervivencia de los mayores proyectos de astronomía terrestre

Katie Worth

Desde hace quince años, tres grupos de astrónomos han estado persiguiendo el mismo sueño: construir el mayor telescopio sobre la faz de la Tierra. El coloso que cada uno de ellos pretende erigir será tres veces más grande que los mayores telescopios ópticos existentes hoy en el mundo, con capacidad para captar imágenes de planetas que orbitan estrellas lejanas y estudiar todo el universo, remontándose en el tiempo hasta casi la gran explosión.

Ese observatorio de ensueño se presenta en tres versiones: el Telescopio Gigante Magallanes (GMT, por sus siglas en inglés), desarrollado por un consorcio al que pertenece la Institución Carnegie para la Ciencia, con sede en Washington; el Telescopio de Treinta Metros (TMT), proyectado por el Instituto de Tecnología de California (Caltech), las universidades de dicho estado y otros socios; y el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), concebido por el Observatorio Europeo Austral (ESO). La construcción de los tres instrumentos ascendería a unos 4000 millones de dólares, pero, por ahora, los grupos siguen sin financiación y presionan para conseguirla. Hoy ya podría haber al menos un telescopio gigante en funcionamiento; en su lugar, solo hay equipo parcialmente construido que aguarda su instalación en lugares inhóspitos.

Es probable que los tres observatorios acaben llegando renqueantes a la meta y que comiencen a operar en algún momento de la década de 2020, aunque con retraso y sobrecostes. Pero ¿a qué se debe esta situación? ¿Cómo es posible que tres proyectos con objetivos comunes hayan terminado compitiendo entre sí para obtener financiación? ¿Por qué no han aunado esfuerzos para minimizar la posibilidad de un fracaso colectivo?

Tales preguntas han sido formuladas en repetidas ocasiones por varios agentes, incluido un desconcertado comité estadounidense que debía considerar la financiación federal de dos de los telescopios. Las docenas de científicos entrevistados para este artículo han reflexionado sobre qué podría haber sucedido si, en vez de tres proyectos, se hubiesen propuesto solo uno o dos. Casi todos admiten que, si los grupos en contienda no hubiesen rechazado numerosas oportunidades de colaboración, hoy la humanidad estaría mucho más cerca de disponer de la última generación de observatorios de gran tamaño. La competencia entre dos de ellos se remonta a principios del siglo xx, época desde la que se ha mantenido debido a rivalidades personales, falta de comunicación, pugnas tecnológicas y un expansivo universo de rencor.



Katie Worth es periodista de *Frontline*, una producción televisiva de la cadena WGBH de Boston. Su trabajo se centra en ciencia, política y la intersección entre ambas.

EL GRAN ACUERDO

Nuestra historia comienza en 1917. Aquel año, un ambicioso astrónomo llamado George Ellery Hale presentó algo completamente nuevo para la ciencia: un telescopio óptico de 2,5 metros (100 pulgadas) de diámetro.

El tamaño resulta fundamental en un telescopio. Cuanto mayor sea el espejo del instrumento, más lejos podrá observar. Instalado en el Monte Wilson, en lo que por entonces aún era un oscuro condado de Los Ángeles, el nuevo aparato eclipsó a todos los de la época. Su tamaño revolucionario propició con rapidez resultados revolucionarios. Gracias a él, Edwin Hubble descubrió que nuestra galaxia era solo una entre muchas y obtuvo pruebas de la expansión del universo. Pero Hale no quedó satisfecho. Quería un telescopio de 5 metros.

La entonces denominada Institución Carnegie de Washington, una organización sin ánimo de lucro fundada por el magnate del acero Andrew Carnegie, había construido y manejado el telescopio de 2,5 metros. Pero Carnegie no estaba dispuesto a invertir más millones en un nuevo instrumento, por lo que Hale acudió astutamente a la organización de un rival: el petrolero John D. Rockefeller. En 1928, Rockefeller en persona aprobó el telescopio de 5 metros de Hale, al que contribuyó con 6 millones de dólares; por entonces, la mayor suma jamás donada a un proyecto científico.

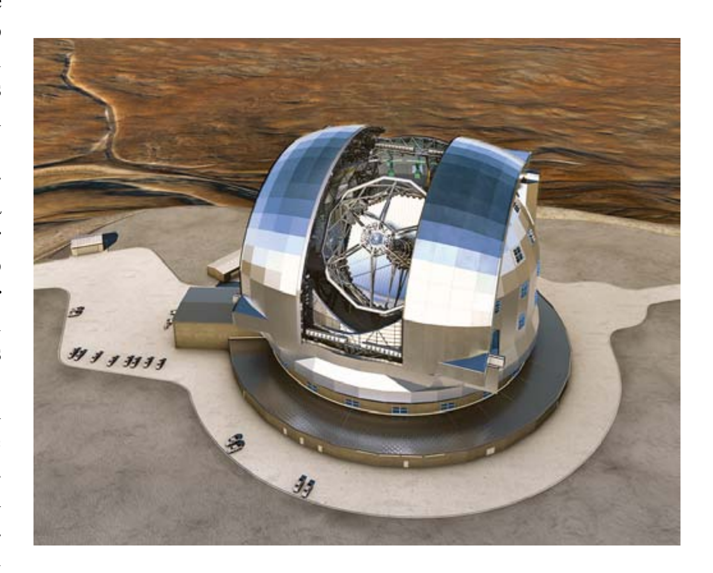
Sin embargo, había un problema: los astrónomos en la Institución Carnegie eran los únicos del mundo con la experiencia necesaria para construir el nuevo telescopio, pero Rockefeller no estaba dispuesto a subvencionar a la fundación de su viejo rival. «Algo así no iba a suceder nunca», afirma el historiador Ronald Florence, autor de *The perfect machine*, un libro sobre el telescopio de 5 metros. «Ello generó las circunstancias perfectas para que surgiesen los problemas.»

Hale propuso una solución. Rockefeller donaría el dinero del telescopio como regalo para Caltech, que acababa de fundarse en Pasadena, a solo tres kilómetros del observatorio de Carnegie. Caltech era aún tan reciente que no tenía en su plantilla ni un solo astrónomo, por no hablar de un departamento de astrofísica. A pesar de ello, la Fundación Rockefeller financió la construcción en Caltech del nuevo telescopio de Hale y del Observatorio Palomar, en el condado de San Diego, que lo acogería. Hale creyó que los responsables de Carnegie no podrían resistirse a trabajar con un instrumento tan magnífico, por lo que se avendrían a diseñarlo y construirlo.

Pero no ocurrió así. Según Florence, la propuesta enfureció a John Merriam, presidente de Carnegie, quien lo consideró un engaño imperdonable. Trabajó para echar por tierra el proyecto, prohibió a sus científicos que colaborasen en él y presionó a la Fundación Rockefeller para que se marchase. Desesperado, Hale acudió al diplomático Elihu Root, viejo amigo de Rockefeller y Carnegie. Root persuadió a Merriam, que finalmente aceptó.

Pero las desavenencias no habían hecho más que empezar. Aún molesto, Merriam intentó durante años arrebatar el control a Caltech, explica Florence, hasta que la desconfianza institucional se hizo mutua y profunda. Tras la jubilación de Merriam, las organizaciones pactaron por fin una frágil tregua. La Fundación Rockefeller propuso un acuerdo: Caltech sería el propietario del telescopio cuando viese su primera luz en 1949, pero Carnegie lo haría funcionar.

La frágil relación entre ambas instituciones acabó salpicando los asuntos científicos, sobre todo tras el descubrimiento a principios de los años sesenta de los «objetos cuasi estelares» (cuásares) por parte del astrónomo neerlandés-estadounidense Maarten Schmidt. Aunque en un principio parecían estrellas



tenues, trabajos posteriores demostraron que radiaban con una luminosidad casi inconcebible desde los confines del universo. Convertidos en los objetos astronómicos más atractivos del momento, los investigadores de Caltech y Carnegie pugnaban por el tiempo de observación para poder estudiarlos con el mayor telescopio del mundo, recurriendo en ocasiones a «una mezquindad propia de adolescentes», apunta Florence.

En 1979, tras medio siglo de tensiones, Caltech intentó poner fin a la tensa custodia compartida del Observatorio Palomar. La separación no fue bien y se convirtió en algo profundamente personal. El difunto Allan Sandage, legendario astrónomo de Carnegie que había hecho buena parte de su carrera en Palomar, se negó a pisar de nuevo el observatorio. «Fue la clase de

EN SÍNTESIS

La comunidad de astronomía óptica lleva años diseñando la construcción de tres gigantescos observatorios terrestres: el Telescopio de Treinta Metros (TMT), el Telescopio Gigante Magallanes (GMT) y el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT).

Se prevé que los tres comiencen a funcionar en la década de 2020. Cada uno contará con un espejo primario de unos 30 metros de diámetro, un tamaño sin precedentes que permitirá estudiar el cosmos con una resolución y claridad jamás alcanzada hasta ahora.

A pesar de ello, los tres proyectos siguen buscando financiación. Ello ha suscitado la pregunta de por qué la comunidad insiste en construir tres instrumentos tan similares. La respuesta reside en una vieja rivalidad que se remonta a principios del siglo XX.

CORTESÍA DE L. CALÇADA, ESO

divorcio donde tenías que escoger entre el marido o la esposa», ejemplifica Florence. «No se podía ser amigo de ambos.»

DISEÑOS EN CONFLICTO

Durante las dos décadas siguientes ambas instituciones recorrieron caminos separados. En los años noventa, Caltech se asoció con la Universidad de California para construir en Mauna Kea, Hawái, los telescopios gemelos Keck, de 10 metros. A tal fin desarrollaron un espejo segmentado compuesto de múltiples piezas. Aunque innovadora para la época, su apuesta tuvo éxito: el diseño funcionó a la perfección y sus astrónomos disfrutaron de años de primacía científica. Mientras tanto, Carnegie se quedó atascada en la técnica de un solo espejo, pero se aventuró en el hemisferio austral y comenzó la construcción de los telescopios gemelos Magallanes, de 6,5 metros, en el desierto de Atacama, al norte de Chile.

En 1999, cuando Carnegie estaba a punto de concluir sus observatorios, Caltech y la Universidad de California anunciaron su intención de erigir un telescopio de 30 metros. Mientras, el ESO, una organización intergubernamental europea, ya había comenzado a considerar algo aún más ambicioso: el Telescopio Abrumadoramente Grande (OverWhelmingly Large Telescope, OWL), de nada menos que 100 metros de diámetro.

Para la mayoría de los astrónomos, pasar de un telescopio de 10 metros a otro de 100 constituía una ambición absurda. Pero, para consternación de Gus Oemler, por entonces director de los observatorios de Carnegie, un instrumento de 30 metros sí parecía viable. El investigador recuerda sentirse enfermo cuando se enteró del proyecto de Caltech: «Estábamos luchando para terminar los telescopios Magallanes, que tras muchos años nos iban a colocar en cierto pie de igualdad con respecto a Caltech, y de repente ellos ya estaban en la siguiente fase».

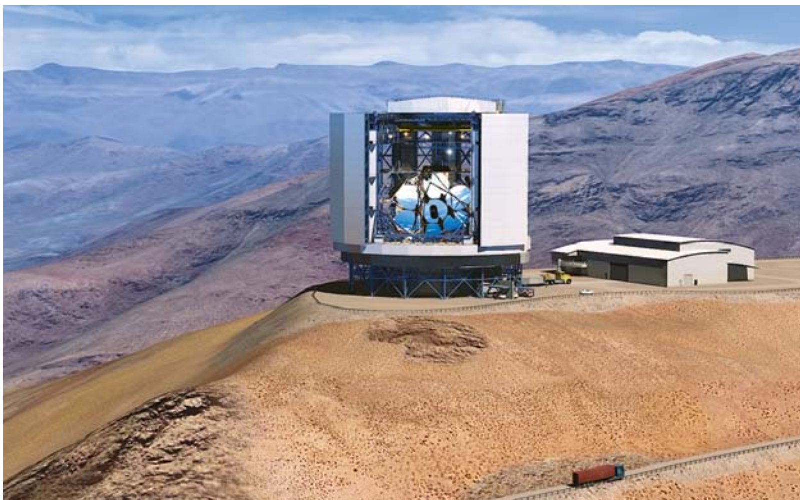
Después de numerosos debates, Carnegie se dirigió a Caltech para establecer una colaboración. Ambas partes mostraban recelos, pero los consejos directivos de ambas instituciones pensaron que ya era el momento de acabar con la división y los viejos resentimientos. «Admitimos que era una locura tener dos telescopios gigantes dependientes de dos instituciones separadas tres kilómetros», recuerda Alan Dressler, astrónomo de Carnegie. Así las cosas, el 21 de junio del año 2000, dos científicos de Caltech, el difunto astrónomo Wal Sargent y el también fallecido Tom Tombrello, por entonces director del departamento de física, y dos de Carnegie, Oemler y Dressler, se reunieron para debatir sobre una posible colaboración.

Según todas las fuentes, el encuentro fue un desastre: una reunión tensa, inconexa y repleta de malentendidos. Tanto Wendy Freedman, que posteriormente se convertiría en directora de los observatorios de Carnegie, como Richard Ellis, hoy científico principal en el ESO pero que por entonces estaba a punto de sustituir a Sargent como director del Observatorio Palomar de Caltech, hablaron con los cuatro justo después y escucharon una historia diferente de cada uno. Dressler consideró que los representantes de Caltech no se habían tomado la propuesta de Carnegie en serio, mientras que Tombrello creyó erróneamente que Carnegie no tenía suficiente dinero con el que contribuir. Oemler dijo que Sargent había mantenido un silencio glacial durante la mayor parte de la reunión. Más tarde, Sargent adujo que estaba preocupado por arruinar la delicada relación que existía entonces entre Caltech y la Universidad de California. Sin embargo, Ellis asegura que Sargent no expresó dicha preocupación durante el encuentro, así que, «por supuesto, la gente de Carnegie se ofendió».

Al día siguiente, Tombrello envió un correo electrónico para resumir su «inconexo debate». Escribió que la gente de Caltech no estaba interesada en trabajar con Carnegie, aunque no excluía la posibilidad en caso de que los costes aumentasen. Los astrónomos de Carnegie se sintieron despreciados e insultados. La incipiente colaboración fracasó y la larga tradición de asperezas entre ambas instituciones no hizo sino prolongarse.

Esa reunión forma hoy parte de la cultura popular sobre telescopios gigantes. Ellis es uno de los muchos astrónomos que se preguntan qué habría sucedido si el encuentro se hubiese desarrollado de otra manera: «Al recordar aquel momento... ¡qué tragedia! Con unas llamadas telefónicas y un poco de diplomacia podríamos haber incorporado a Carnegie. Y, de haberlo hecho, es probable que hoy tuviésemos un telescopio». Garth Illingworth,





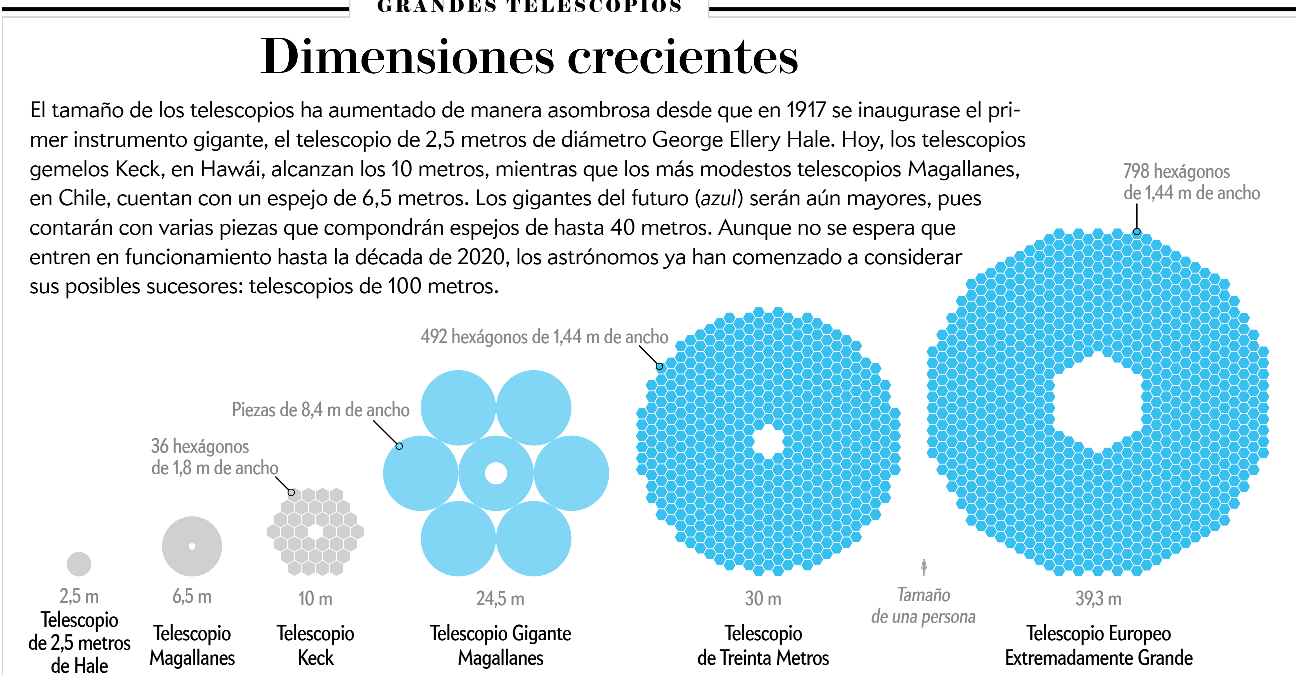
GIGANTES DE VIDRIO: El Telescopio de Treinta Metros (*arriba a la izquierda*) y el Telescopio Gigante Magallanes (*arriba a la derecha*) tendrán aproximadamente el mismo tamaño; el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (*página opuesta*), aún mayor, contará con un espejo de casi 40 metros.

CORTESÍA DE LA ORGANIZACIÓN DEL TELESCOPIO DE TREINTA METROS (*izquierda*); CORTESÍA DE LA ORGANIZACIÓN DEL TELESCOPIO GIGANTE MAGALLANES (*derecha*)

GRANDES TELESCOPIOS

Dimensiones crecientes

El tamaño de los telescopios ha aumentado de manera asombrosa desde que en 1917 se inaugurase el primer instrumento gigante, el telescopio de 2,5 metros de diámetro George Ellery Hale. Hoy, los telescopios gemelos Keck, en Hawái, alcanzan los 10 metros, mientras que los más modestos telescopios Magallanes, en Chile, cuentan con un espejo de 6,5 metros. Los gigantes del futuro (*azul*) serán aún mayores, pues contarán con varias piezas que compondrán espejos de hasta 40 metros. Aunque no se espera que entren en funcionamiento hasta la década de 2020, los astrónomos ya han comenzado a considerar sus posibles sucesores: telescopios de 100 metros.



astrónomo de la Universidad de California en Santa Cruz, opina que aún subsistía el suficiente resentimiento para echar por tierra una conversación constructiva. «Simplemente piensas, Dios mío, ¿por qué no hubo un poco de supervisión adulta que ayudase a esos tipos a superarlo?»

DIVISIÓN Y FRACASO

La rivalidad aumentó tras aquel intento de negociación fallido. Caltech y la Universidad de California desarrollaron el TMT con intención de levantarlo junto a los telescopios Keck, en Hawái. Mientras tanto, Carnegie diseñó el GMT, un instrumento de 24,5 metros que coronaría el Observatorio Las Campanas, en Chile. Más o menos al mismo tiempo, los europeos abandonaron su sueño de construir un telescopio abrumadoramente grande y se decantaron por uno que solo fuese extremadamente grande: el E-ELT, que mediría 39 metros y se erigiría en Chile.

Los tres proyectos se lanzaron a buscar financiación por todo el mundo, lo que en ocasiones los llevó a recalar en los mismos sitios. La oferta típica consistía en pedir dinero y garantizar a cambio tiempo de observación. Los astrónomos canadienses, por ejemplo, fueron tentados tanto por Carnegie como por Caltech y se decantaron por estos últimos. Ambos grupos llamaron también a las puertas de Harvard, que al final se comprometió con Carnegie. Al menos en una ocasión, los equipos de las dos instituciones tuvieron un incómodo encuentro en el aeropuerto cuando iban a visitar al mismo socio potencial. Y los europeos no permanecieron ajenos a la refriega. En un principio se aseguraron el apoyo de Brasil, cuyo presidente accedió a unirse al ESO y a hacerse cargo de una buena parte del E-ELT, pero la dividida política brasileña acabó paralizando el acuerdo. Mientras tanto, Carnegie ha sacado provecho a las penurias del E-ELT. En julio de 2014, la Universidad de São Paulo se unió al GMT. La directiva del proyecto esperaba que pronto se sumase el Gobierno brasileño, aunque al final no fue el caso.

Hasta ahora, el socio más codiciado de todos ha sido el Gobierno de Estados Unidos. En el año 2000, el Estudio Decenal de Astronomía y Astrofísica, un comité nacional que una vez cada diez años asesora sobre la financiación federal estadounidense, había declarado la construcción de un telescopio gigante de última generación como la máxima prioridad nacional en astronomía óptica terrestre. Con ese respaldo, la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF) comenzó a considerar en 2003 una colaboración con el TMT de Caltech. Pero, al cabo de unos meses, los astrónomos del GMT escribieron una carta en la que argumentaban que el acuerdo favorecía injustamente al TMT. La misiva tuvo éxito: la NSF cambió de opinión y se mostró reticente a tomar partido en la cada vez más dividida astronomía óptica de primer nivel. Wayne Van Citters, asesor veterano de la NSF, explica que, en cualquier caso, no había mucho dinero federal que aportar, pero la contienda no ayudó: «Necesitábamos una comunidad de astrónomos unida que decidiese por sí misma qué telescopio quería construir. No podíamos financiar ambos».

Los científicos lo intentaron repetidas veces, pero todos los esfuerzos fueron estériles. Los europeos intentaron asociarse con ambos rivales, pero al final solo llegaron a un acuerdo para compartir avances tecnológicos. En 2007, por insistencia de sus consejos, los líderes del TMT y el GMT celebraron varias reuniones en un ambiente de fría cordialidad para debatir canales de colaboración, pero sin resultado. En 2010 la situación desconcertó a los miembros del comité decenal, que se preguntaron por qué la comunidad astronómica de EE.UU. estaba solicitando apoyo para dos grandes telescopios ópticos en el país. Al final no apoyaron a ninguno de ellos y relegaron ambos proyectos a la cola de la lista de prioridades, lo que en la práctica supuso la anulación de la financiación federal por otros diez años.

La rivalidad no es rara en ciencia. Las mentes brillantes vienen a menudo acompañadas por grandes egos con tendencia al conflicto. Unas veces esa enemistad genera innovación, pero otras puede convertir la noble persecución del descubrimiento en una sucesión de mezquinos conflictos personales. Algunas disciplinas han logrado una colaboración fructífera entre potenciales rivales; los físicos de altas energías, por ejemplo, tra-

DAISY CHUNG

bajan en enormes equipos internacionales en los aceleradores de partículas. Y los radioastrónomos han aglutinado esfuerzos para construir la mayor herramienta de última generación en su campo, el Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA), con un coste de 1400 millones de dólares. Por el contrario, la astronomía óptica estadounidense ha estado marcada por la división. En un discurso pronunciado en 2001 ante la Academia Nacional de las Ciencias del país, el astrónomo italo-norteamericano y premio nóbel Riccardo Giacconi lo describió como un problema sociológico.

Para W. Patrick McCray, historiador de la Universidad de California en Santa Bárbara y autor de *Giant telescopes*, un libro sobre la comunidad estadounidense de astronomía óptica, lo sorprendente de la enemistad entre Caltech y Carnegie es su longevidad. Han estado discutiendo sobre grandes telescopios desde 1928. «¿Es que no han aprendido nada?», se pregunta.

Pero la rivalidad tampoco permite explicarlo todo. Hay argumentos racionales para querer trabajar con dos telescopios independientes, señala Ray Carlberg, astrónomo de la Universidad de Toronto y miembro de una asociación implicada en la construcción del TMT. En un principio, la comunidad pensó que habría dinero para los tres proyectos y que disponer de instrumentos en los dos hemisferios permitiría estudiar todo el cielo. «Ya se habían construido unos cuantos telescopios de ocho y diez metros, por lo que no parecía una locura disponer de varios de los más grandes», apunta Carlberg. Y en la época en que quedó claro que Caltech podría contar con la ayuda de Carnegie, estos ya estaban demasiado enfrascados en su proyecto como para abandonarlo.

DEMASIADOS TELESCOPIOS

En Hawái, un rincón de la inmensa cima del Mauna Kea ha sido aplanado para ubicar el TMT. Su espejo de 30 metros estará compuesto por una estructura en forma de panal formada por 492 segmentos hexagonales de 1,44 metros cada uno, alojados en una estructura de 18 pisos que se alzará sobre el volcán dormido. El proyecto obtuvo los permisos para usar el terreno, aunque aún se enfrenta a una enérgica oposición por parte de grupos indígenas y ambientalistas. (El pasado 2 de diciembre, el Tribunal Supremo de Hawái atendió dichas quejas y revocó el permiso de construcción.) Para hacer frente a la financiación de 1500 millones que necesitan, Caltech y el sistema universitario de California han firmado colaboraciones internacionales con India, China, Canadá y Japón. Aún buscan otros 270 millones de dólares, lo que supone el cálculo más optimista para que el proyecto comience a andar en algún momento de la década de 2020.

A once manzanas de la sede del TMT en Pasadena, Carnegie y sus socios están revitalizando el GMT, que medirá 24,5 metros. Constará de siete espejos de 8,4 metros de diámetro, con seis de ellos dispuestos en forma de pétalos de flor alrededor de uno central. Este diseño difiere en gran medida del elegido para el TMT, que contará con muchas más piezas de menor tamaño. Cuatro espejos ya han sido fabricados en un laboratorio en la Universidad de Arizona. Unas dimensiones más modestas implican también un coste menor: poco menos de 1000 millones de dólares. Carnegie ha logrado el apoyo de universidades de Corea del Sur, Australia y Brasil, así como el de varias universidades estadounidenses. Por el momento, ha recaudado en torno a la mitad del presupuesto necesario para instalar el instrumento en el Observatorio Las Campanas. Si todo va según lo previsto, el GMT verá su primera luz en 2022.

Por la Carretera Panamericana, a unas 12 horas en coche desde Las Campanas, se llega al cerro Armazones, la desértica montaña donde un día se asentará el E-ELT. El lugar fue considerado en un principio por los astrónomos del TMT, que durante años analizaron la transparencia y la turbulencia de la atmósfera antes de concluir que preferían levantar su telescopio en el hemisferio norte. Al final, los europeos aprovecharon ese trabajo y reclamaron Armazones para su proyecto. Hoy, una carretera recientemente pavimentada conduce hasta la cima pelada de la montaña, allanada con dinamita y maquinaria pesada hasta alcanzar las dimensiones de un campo de fútbol. Al este puede verse el volcán Llullaillaco, de 6723 metros, donde los incas sacrificaban niños a sus dioses. Al anochecer, la cima y el resto del árido panorama se desvanecen y dejan paso a un firmamento rebosante de estrellas.

Con un espejo de 39 metros, el E-ELT será el mayor de todos los telescopios de última generación. Al igual que el TMT, el proyecto europeo contará con un espejo segmentado, pero en vez de 492 piezas llegará a las 798. En diciembre de 2014 el ESO aprobó avanzar en la construcción de la primera fase, aunque aún no hay presupuesto para la segunda. La dirección del E-ELT planea que el telescopio, cuyos costes totales se estiman en 1100 millones de euros, comience a funcionar en 2024.

Roberto Gilmozzi, del E-ELT, afirma que, cuando los tres observatorios estén construidos, sus respectivos potenciales se reforzarán mutuamente. El E-ELT se especializará en imágenes de alta resolución de pequeñas regiones del firmamento, mientras que el GMT destacará en astronomía de gran angular. Por su parte, el TMT trabajará desde el otro hemisferio, por lo que tendrá a su disposición un cielo diferente.

Al igual que la mayoría de los astrónomos entrevistados para este artículo, Gilmozzi opina que, si se hubieran propuesto dos telescopios en lugar de tres, hoy ambos estarían a punto de finalizar su construcción y la comunidad se habría ahorrado unos cuantos cientos de millones. «Si obviamos el problema de la financiación, es maravilloso tener más de uno», señala.

Por desgracia, levantar un observatorio constituye solo el primer paso. Hoy por hoy, ni el GMT ni el TMT disponen de fondos suficientes para su mantenimiento. Ambos esperan que el Gobierno estadounidense acuda finalmente en su ayuda, pero Van Citters explica que no está claro cuánto dinero podrá aportar. Se calcula que los costes de operación de cada telescopio ascenderán a varias decenas de millones al año. «Lo suficiente para provocar pesadillas», en palabras de McCray.

Con todo, el problema de que haya demasiados telescopios tiene también un aspecto positivo: el mundo dispondrá algún día de tres gigantescos ojos para estudiar el cosmos, lo que McCray interpreta como una gran victoria para la ciencia. «Si esta situación es una tragedia, es una tragedia con minúsculas», remacha el investigador.

PARA SABER MÁS

Giant telescopes: Astronomical ambition and the promise of technology. W. Patrick McCray. Harvard University Press, 2004.
Star wars. Michael West en *Scientific American*, julio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los grandes telescopios del futuro. Roberto Gilmozzi en *IyC*, julio de 2006.
El próximo observatorio espacial. Robert Irion en *IyC*, diciembre de 2010.
La carrera por el mayor refractor del mundo. Wolfgang Steinicke y Stefan Binnewies en *IyC*, enero de 2013.

PALEONTOLOGÍA

¿QUÉ CAUSÓ LA EXTINCIÓN DE LOS DINOSAURIOS?

El impacto del asteroide resultó mortífero, sobre todo por el momento en que se produjo

Stephen Brusatte

La Iglesia del Salvador sobre la sangre derramada, en San Petersburgo, parece un lugar salido de un cuento de hadas. Situada al borde de un canal helado, está coronada por un bosque de cúpulas que apuntan hacia el cielo, y un mosaico de colores pastel cubre cada centímetro de su interior. Aunque no es el tipo de lugar que suele atraer a los paleontólogos, había ido a esa ciudad para estudiar un nuevo dinosaurio y decidí desviarme de mi camino. La visita era personal. La iglesia fue construida en el lugar donde el zar Alejandro II fue asesinado por los revolucionarios en 1881, lo que puso en marcha una serie de sucesos que, en última instancia, llevaron hasta mí. La muerte del zar marcó el comienzo de un frenesí de persecuciones contra los judíos. Algunos de los que vivían en la periferia del imperio ruso se asustaron, entre ellos una familia de Lituania, que envió a su hijo menor a Estados Unidos para ponerlo a salvo. Ese hombre era mi bisabuelo. Si no fuera por esa serie de coincidencias que tuvieron lugar hace más de cien años en San Petersburgo, hoy no me hallaría aquí.

EN SÍNTESIS

La extinción de los dinosaurios constituye uno de los grandes enigmas de la ciencia.

Hace décadas se propuso la popular teoría de que el impacto de un asteroide llevó a la desaparición de todo el grupo.

Pero algunos escépticos se preguntaban si otros factores habrían contribuido a su extinción.

Un nuevo estudio indica que en el momento en que impactó el asteroide las comunidades de dinosaurios se hallaban en una situación vulnerable.

JON FOSTER



Todas las familias pueden contar historias similares a esa, con extraños giros del destino en un pasado distante sin los cuales el presente sería muy diferente. La evolución funciona también de esta manera. La historia de la vida es un relato lleno de contingencias y se halla sujeta a cambios en cualquier momento. De hecho, eso es precisamente lo que ocurrió hace 66 millones de años, al final del período Cretácico. Durante 150 millones de años los dinosaurios habían dominado el planeta, llegando a adquirir tamaños colosales y a prosperar en casi todos los ecosistemas terrestres imaginables. Pero entonces algo cambió y *Tyrannosaurus*, *Triceratops* y sus semejantes desaparecieron.

La extinción de los dinosaurios, uno de los mayores enigmas científicos, consiguió que de adolescente me apasionase por la ciencia. Durante la última década he recuperado fósiles de dinosaurios en numerosas partes del mundo y no he dejado de plantearme la siguiente pregunta: ¿cómo es posible que desapareciesen unas criaturas tan poderosas? Una teoría muy extendida, propuesta en los años ochenta del siglo xx, atribuye la culpa a un asteroide. Pero algunos escépticos se han preguntado si otros factores habrían contribuido a la extinción. A medida que descubrimos nuevos dinosaurios y ganamos conocimiento sobre la evolución de este grupo, cada vez nos hallamos más cerca de una respuesta definitiva.

Hace poco organicé una gran reunión internacional de paleontólogos para analizar lo que hoy sabemos sobre la causa de la extinción de los dinosaurios. Utilizamos toda la información actualizada sobre la diversidad de estos reptiles para verificar las tendencias evolutivas a través del tiempo; revisamos las dataciones más recientes del momento de la extinción y examinamos con una perspectiva amplia los cambios ambientales que se produjeron en la época en que los dinosaurios perecieron. Para nuestra sorpresa, el equipo, compuesto por una docena de expertos en dinosaurios con diversas opiniones y propensos al debate, llegó a un acuerdo: tal y como sostiene la teoría más conocida, la extinción fue brusca y estuvo causada principalmente por la caída de un asteroide. Sin embargo, tal visión era incompleta. El impacto del asteroide coincidió, además, con un momento poco propicio para los dinosaurios, cuando sus ecosistemas se hallaban en una situación muy vulnerable debido a los cambios ambientales que se habían producido con anterioridad. Ello confiere un giro nuevo e inesperado a la noción anterior, lo cual tiene una gran relevancia para el mundo moderno y para nuestra propia historia evolutiva.

UN MISTERIO DURADERO

Como la mayoría de los adolescentes, cuando estudiaba en la escuela secundaria cometí alguna imprudencia. Quizá lo más descarado que hice fue coger el teléfono un día de primavera de 1999, cuando contaba quince años, y llamar a Walter Álvarez, geólogo de la Universidad de California en Berkeley. Era un miembro eminente de la Academia Nacional de Ciencias y hacía casi veinte años había propuesto la idea de que el impacto de un gran asteroide había eliminado los dinosaurios. Su hipótesis surgió a partir de una curiosa observación. El registro geológico conserva una banda delgada de arcilla que marca el límite entre los sedimentos que contienen fósiles de dinosaurios del período Cretácico (hace entre 66 millones y 145 millones de años) y los sedimentos del Paleógeno (hace entre 23 millones y 66 millones de años), que carecen de tales fósiles. Álvarez descubrió que ese estrato de arcilla contenía altas concentraciones de iridio, un elemento infrecuente en la Tierra pero abundante en cuerpos extraterrestres como cometas y asteroides. Fue el primero que detectó esta anomalía en una garganta rocosa cerca de la ciudad de Gubbio, en la región italiana de Umbría. Casualmente, mi familia estaba preparando un viaje a Italia para celebrar el vigésimo aniversario de la boda de mis padres. Los obligué a interrumpir las visitas a los museos de arte y basílicas para ir un día a Gubbio y ver el fenómeno geológico que había dado lugar a la famosa hipótesis del asteroide de Álvarez. Pero necesitaba indicaciones, así que decidí acudir directamente a la fuente.



Stephen Brusatte es paleontólogo de la Universidad de Edimburgo. Sus investigaciones se centran en la evolución y la anatomía de los dinosaurios. En su último artículo en *Investigación y Ciencia* analizaba la evolución de los tiranosaurios.

Álvarez no solo respondió a mi llamada, sino que también me dio instrucciones detalladas para llegar al lugar exacto en la quebrada donde él había descubierto las altas concentraciones de iridio. No esperaba que un eminente científico fuese tan amable y tan generoso con su tiempo. Su teoría del asteroide fue publicada en *Science* en 1980, junto con su padre Luis, ganador del premio Nobel de física, y dos colegas de Berkeley, y esta desató una década de intenso debate. Los dinosaurios y las extinciones masivas aparecían constantemente en las noticias. La idea del impacto se recogió en innumerables libros y documentales de televisión; y en cientos de artículos científicos se discutía sobre la causa de la muerte de los dinosaurios. Paleontólogos, geólogos, químicos, ecólogos y astrónomos participaban en el problema científico más candente del momento.

A finales de los años ochenta resultaba innegable que 66 millones de años atrás un asteroide o cometa se había estrellado contra nuestro planeta. En otros lugares de la Tierra se había identificado la misma capa de iridio. Junto a este elemento se descubrieron también algunas rarezas geológicas asociadas a los impactos extraterrestres, como pequeños fragmentos vítreos llamados tectitas y granos de cuarzo deformados por una fuerte colisión. Además, los geólogos localizaron un cráter de 180 kilómetros de diámetro que data del momento exacto en que se extinguieron los dinosaurios: el cráter de Chicxulub, en México. Algo inesperado y enorme, de unos diez kilómetros de diámetro, había llegado desde el espacio y había provocado un cataclismo de erupciones volcánicas, incendios forestales y tsunamis; la lluvia ácida y el polvo impedían la llegada de la luz del sol, y todo ello condenó a los dinosaurios.

No obstante, aún se disponía de muy poca información sobre cómo esos animales habían evolucionado durante el período previo al impacto y el modo en que ellos y sus ecosistemas respondieron a ese desastre ambiental extraordinario. De ahí que se siguiera debatiendo si el asteroide había eliminado a los dinosaurios de forma repentina, cuando gozaban de un momento de plenitud, o bien si este propinó el golpe final a un grupo moribundo que estaba perdiendo terreno y que se habría extinguido igualmente. Después de todo, el asteroide no impactó sobre un planeta estático, sino sobre uno que experimentaba

fluctuaciones drásticas del nivel del mar, cambios de temperatura y un nivel de vulcanismo extremo. ¿Había contribuido alguno de estos factores a la extinción?

HALLAZGOS RECIENTES

Pero durante ese viaje familiar a Italia no pude visitar Gubbio. Las inundaciones habían cerrado la línea ferroviaria principal desde Roma y me sentí desolado. Sin embargo, el destino me ofrecería una segunda oportunidad, ya que cinco años más tarde regresé a Italia con ocasión de un curso de exploración geológica de la universidad. Nos alojamos en un pequeño observatorio en los Apeninos a cargo de Alessandro Montanari, uno de los numerosos científicos que en los años ochenta destacaron por haber estudiado la extinción de finales del Cretácico. El primer día visitamos el centro y, al pasar por la biblioteca, advertimos una figura solitaria examinando un mapa geológico bajo una luz parpadeante. Montanari, con su musical acento italiano, nos dijo: «Quiero que todos conozcan a mi amigo y mentor, Walter Álvarez. Tal vez algunos de ustedes ya hayan oído hablar de él».

Unos días más tarde nos hallábamos en la garganta de Gubbio. Álvarez, de pie frente a nuestro grupo, apuntaba al lugar exacto donde se concibió la teoría del asteroide. Mis compañeros de clase se burlaron de mí porque, cuando me presenté a Álvarez y él recordó la conversación que habíamos mantenido cinco años antes, yo no podía dejar de sonreír. Ese día quedó grabado en mi memoria como uno de los momentos más importantes de mi carrera científica. Supe entonces que el enigma de la extinción de los dinosaurios se había apoderado de mí.

Paradójicamente, cuando empecé el doctorado, mi investigación se centró en la expansión de los dinosaurios y en el origen y la evolución de las primeras aves (que descienden de ellos y, por lo tanto, representan el único grupo de dinosaurios que no se extinguió). Pero finalmente tuve la oportunidad de participar en el debate sobre la extinción de los dinosaurios en 2012, cuando estaba terminando mis estudios de posgrado. Mi colega Richard Butler, de la Universidad de Birmingham, que utiliza la estadística para estudiar tendencias evolutivas, tuvo una idea ingeniosa: unir los conocimientos sobre los diferentes grupos de dinosaurios y las distintas técnicas analíticas para reexaminar la forma en que los dinosaurios evolucionaron durante los 10 o 15 millones de años anteriores a su extinción.

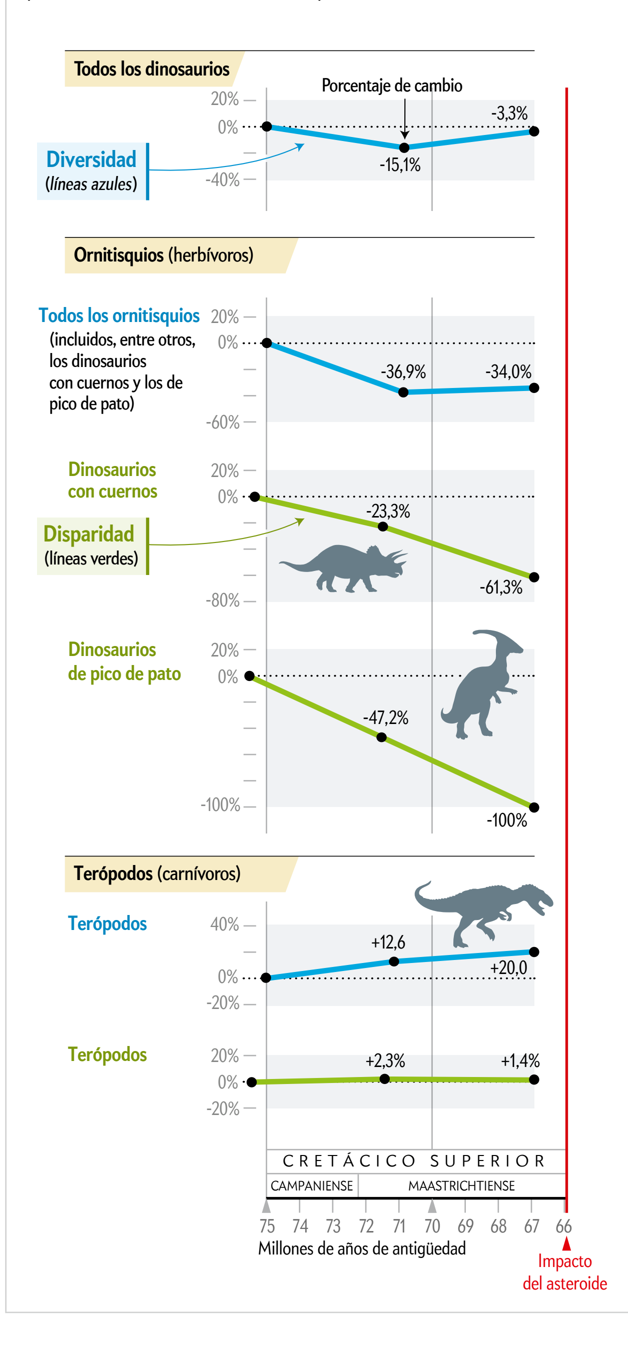
Decidimos analizar los cambios en la diversidad del grupo mediante un método denominado disparidad morfológica. Se trata de una medida anatómica de la biodiversidad que cuantifica la variabilidad en el tamaño, forma y anatomía corporales de un grupo a lo largo del tiempo o en diferentes ecosistemas. Imaginemos dos ecosistemas, uno con 15 especies de pequeños roedores y el otro con un murciélago, una gacela y un elefante. En el primer ecosistema hay un mayor número de especies, pero en el segundo estas presentan una mayor diversidad de tamaños, formas y comportamientos. En ocasiones, la disparidad ofrece una imagen más completa de la vitalidad y de la diversidad biológica que simplemente el número de especies. Queríamos comprobar si existía alguna tendencia en los dinosaurios. Si a finales del Cretácico la disparidad entre ellos aumentaba o permanecía estable indicaría que les iba muy bien cuando el asteroide terminó bruscamente con sus días de gloria. Pero si disminuía significaría que estaban atravesando una época de dificultades que no guardaban relación con los problemas que surgieron a causa del impacto.

Obtuvimos algunos resultados interesantes. La mayoría de los dinosaurios mantuvo un nivel de disparidad constante

TENDENCIA OCULTA

Herbívoros en apuros

El análisis de los dinosaurios de Norteamérica muestra que hace 66 millones de años, cuando un asteroide chocó contra la Tierra, el número total de especies (una medida que expresa la diversidad) estaba aumentando (*gráfico superior*). Pero una mirada más detallada revela algún declive oculto. A uno de los grupos principales, los terópodos, les iba bien (*gráfico inferior*). En cambio, en otro grupo importante, los ornitisquios, la diversidad estaba disminuyendo, así como la disparidad, una medida del grado en que las especies varían en su anatomía y tamaño (*gráfico central*). Dos subgrupos de ornitisquios, los dinosaurios con cuernos y los de pico de pato, se hallaban en peor situación. Su debilitamiento tuvo muy probablemente consecuencias para otros dinosaurios.

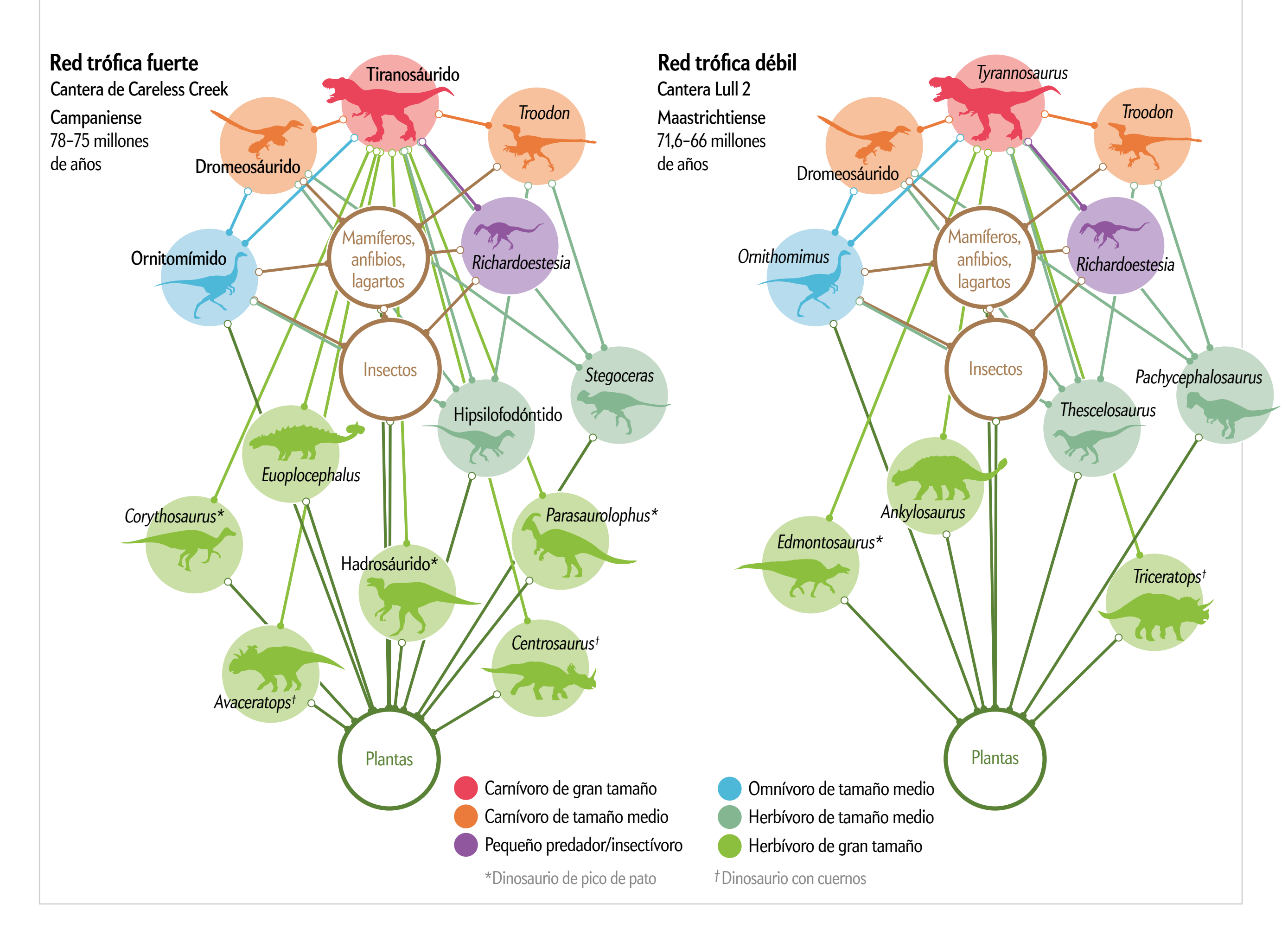


FUENTE: «THE EXTINCTION OF THE DINOSAURS», POR STEPHEN L. BRUSATTE ET AL. EN *BIOLOGICAL REVIEWS*, VOL. 90, N.º 2, MAYO DE 2015

IMPACTO AUMENTADO

Red trófica debilitada

Los modelos informáticos de las redes tróficas del Cretácico superior realizados a partir de los datos de dinosaurios hallados en los yacimientos de la Cantera de Careless Creek, en Montana, y del más reciente de la Cantera Lull 2, en Wyoming, indican que el declive de los dinosaurios con cuernos y los de pico de pato habrían afectado seriamente a otras especies de dinosaurios. Estos herbívoros de gran tamaño eran especies clave que servían como presa a otros dinosaurios carnívoros. Su desaparición habría desestabilizado toda la red trófica y habría dejado a los dinosaurios en una situación vulnerable ante los efectos devastadores de un asteroide.



durante los 10 o 15 millones de años previos a la colisión, entre ellos los terópodos carnívoros (como *Tyrannosaurus* y *Velociraptor*), los saurópodos de cuello largo y los dinosaurios herbívoros de tamaño pequeño o medio (como los paquicefalosaurios, con cráneo abombado). Pero en dos subgrupos la disparidad estaba disminuyendo: los dinosaurios con cuernos (*Triceratops* y otros afines) y los de pico de pato. Ambos eran herbívoros de gran tamaño que consumían enormes cantidades de plantas. Si pudiésemos viajar en el tiempo unos 66 millones de años atrás, comprobaríamos su enorme abundancia. Eran como las vacas del Cretácico, herbívoros que ocupaban un lugar clave en la red trófica.

Casi al mismo tiempo que publicamos nuestros resultados, otros investigadores estaban analizando la extinción de los dinosaurios desde otro ángulo. Los equipos dirigidos por Paul Upchurch, del Colegio Universitario de Londres, y Paul Barrett, del Museo de Historia Natural de Londres, realizaron un censo de la diversidad de especies de dinosaurios a lo largo del tiempo y observaron que en conjunto eran unos animales muy diversos cuando impactó el asteroide, pero había un grupo, que incluía los dinosaurios con cuernos y los de pico de pato, cuyo número de especies estaba disminuyendo. Sus hallazgos encajaban perfectamente con nuestros cálculos de disparidad.

¿Cómo influyó en el resto del grupo la reducción en la riqueza de especies y en la disparidad de los grandes dinosaurios herbívoros? Un estudio innovador realizado por Jonathan Mitchell, entonces estudiante de doctorado en la Universidad de Chicago, ofreció algunas pistas. Mediante modelos informáticos, Mitchell y su equipo reconstruyeron las redes tróficas de varios ecosistemas de dinosaurios del Cretácico y simularon qué sucedería si eliminaban algunas de sus especies. El resultado les sorprendió: las redes existentes cuando el asteroide impactó, que constaban de un número menor de grandes herbívoros por el descenso en su diversidad, eran más frágiles que las redes que había unos pocos millones de años antes del impacto.

FUENTE: STEPHEN BRUSATTE; DAISY CHUNG (*gráfico*)

UN MAL MOMENTO

Teniendo en cuenta los abundantes nuevos datos publicados sobre la extinción de los dinosaurios, junto con Butler tuvimos una idea algo osada: tal vez lográramos reunir un grupo de expertos que quisieran sentarse a debatir sobre todo lo que sabíamos en la actualidad acerca de la desaparición de esos reptiles y tratar de llegar a un consenso sobre el motivo que la causó. Al principio nos tomamos la tarea como una diversión, más que todo. Los paleontólogos habían estado deliberando sobre esta cuestión durante décadas. ¿Quiénes éramos nosotros para resolverla? Lo más probable es que termináramos en un punto muerto o, peor aún, discutiendo sin fin. Pero ocurrió todo lo contrario. Nuestro grupo, formado por once científicos de EE.UU., Canadá y Reino Unido, llegó a un acuerdo. Publicamos nuestro estudio en mayo del año pasado en la revista *Biological Reviews*.

Tras revisar todos los datos, llegamos a la siguiente conclusión: los dinosaurios parecían hallarse en una buena situación a finales del Cretácico. No había señales de que su diversidad global (tanto en lo que se refiere al número de especies como a la disparidad) hubiese disminuido durante los últimos millones de años. Todos los grupos principales persistieron hasta la última parte del Cretácico y, al menos en América del Norte, donde el registro fósil de los últimos dinosaurios del Cretácico es muy completo, sabemos que el clan de los *Tyrannosaurus* y *Triceratops* fue testigo del impacto del asteroide. Estos hallazgos permitían descartar la antigua hipótesis de que los dinosaurios se habrían debilitado poco a poco a causa de posibles fluctuaciones en el nivel del mar y la temperatura que alterarían la disponibilidad de territorios y sus fuentes de alimentos. Por el contrario, su extinción fue abrupta en términos geológicos, por lo que era lógico pensar que había sido provocada por el impacto del asteroide, un acontecimiento repentino e inesperado.

Pero, como habíamos sospechado en nuestros estudios anteriores, el asteroide no permitía reconstruir un relato completo. Justo al final del Cretácico, los grandes dinosaurios herbívoros estaban atravesando un pequeño declive. No sabemos la causa exacta de esa crisis, pero tal vez guardara relación con un descenso en el nivel del mar que habría reducido en gran medida su hábitat en los últimos millones de años de su existencia. Al ser los herbívoros más abundantes, los dinosaurios con cuernos y los de pico de pato fueron los primeros que notaron los efectos de los cambios en la disponibilidad de territorios y alimentos. Su declive debió sin duda tener consecuencias: los ecosistemas se volvieron más propensos a sufrir un colapso porque la base de la red trófica se había vuelto inestable, lo que aumentó las probabilidades de que la extinción de unas pocas especies generase un efecto en cadena en todo el ecosistema.

Dicho esto, parece evidente que la colisión del asteroide se produjo en un momento catastrófico para los dinosaurios. Si hubiera sucedido unos pocos millones de años antes, en la época en que había una gran diversidad de herbívoros, los ecosistemas de los dinosaurios se habrían mostrado más resistentes y habrían soportado mejor el impacto. Si hubiera chocado unos pocos millones de años más tarde, quizá la diversidad de los herbívoros se habría recuperado, como ya había sucedido otras veces en los 150 millones de años de evolución de este grupo. Nunca es un buen momento para que un asteroide de diez kilómetros de ancho caiga del cielo, pero para los dinosaurios de hace 66 millones de años quizá fuera el peor posible. Con solo un pequeño cambio en la cronología de la colisión, quizás estarían todavía sobre la Tierra.

Lo que ocurrió hace 66 millones de años, cuando ese trozo de roca y hielo procedente del espacio se estrelló contra México en un momento inoportuno para los dinosaurios, tiene consecuencias aún hoy en día. Las extinciones masivas son trágicas pero también dejan espacio para que nuevas plantas y animales evolucionen y ocupen su lugar. La muerte de los dinosaurios ofreció una oportunidad a los mamíferos que habían vivido en la sombra durante más de 100 millones de años y que se aprovecharon de esta circunstancia para evolucionar sin impedimentos. Los mamíferos florecieron casi inmediatamente después de que se extinguiesen los dinosaurios. Aparecieron grupos de gran tamaño, con numerosas nuevas dietas y comportamientos, y se propagaron a lo largo de todo el planeta. Su auge llevó al origen de los primates y, en última instancia, al de nuestra especie. Si se eliminase cualquiera de los eslabones de esta cadena de sucesos quizá los humanos no existiríamos.

De la extinción de los dinosaurios podemos extraer una lección aún mayor. No solo representa un juego para la imaginación acerca de la contingencia evolutiva. Lo que ocurrió al final del Cretácico nos enseña que incluso los organismos más dominantes pueden extinguirse de modo repentino. Los dinosaurios habían reinado durante más de 150 millones de años antes de que, en una fracción de segundo, algo procedente del espacio colisionase contra la Tierra y provocara su fin. La pérdida de la biodiversidad que precedió al impacto del asteroide quizá favoreció su extinción, o incluso la hizo posible. Los humanos hemos estado aquí, a lo sumo, durante pocos cientos de miles de años. Estamos cambiando el entorno a un ritmo tan acelerado que se está produciendo lo que se conoce como la sexta extinción, con una disminución muy rápida en la biodiversidad mundial. ¿Quién sabe si en este proceso nos estamos haciendo más vulnerables a nosotros mismos?

PARA SABER MÁS

***T. rex* and the crater of Doom.** Walter Alvarez. Princeton University Press, 1997.
The extinction of the dinosaurs in North America. David E. Fastovsky y Peter M. Sheehan en *GSA Today*, vol. 15, n.º 3, págs. 4-10, marzo de 2005.
The extinction of the dinosaurs. Stephen L. Brusatte et al. en *Biological Reviews*, vol. 90, n.º 2, págs. 628-642, mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Causa de una extinción en masa: el impacto de un cuerpo extraterrestre. Walter Álvarez y Frank Asaro en *IyC*, diciembre de 1990.
El episodio de impacto de Chicxulub. David A. Kring y Daniel D. Durda en *IyC*, febrero de 2004.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACIÓN
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 12,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

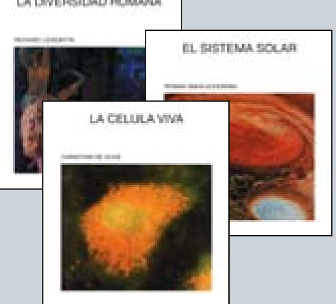
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito *
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas
MyC 75: Evaluar la personalidad
MyC 76: Estimulación cerebral

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales *
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen? *
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética
T-82: La ciencia ante el cambio climático

(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación
Cuadernos 12: El dolor
Cuadernos 13: En busca de la consciencia



por Javier Ábalos, Guillem Pérez i de Lanuza y Enrique Font

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

El lenguaje cromático de la lagartija roquera

La capacidad de visión en el ultravioleta y una rica coloración de la zona ventrolateral configuran el sofisticado sistema de comunicación de esta especie

Tendemos a pensar erróneamente que los animales perciben el mundo que los rodea de la misma manera que nosotros. Sin embargo, cada especie vive inmersa en un mundo sensorial propio y distinto del de otras. Las lagartijas, por ejemplo, poseen un complejo sistema de visión que les permite percibir colores en la luz ultravioleta. Estudios recientes demuestran que esa capacidad favorece la comunicación entre individuos, basada en un refinado código de manchas corporales.

La lagartija roquera (*Podarcis muralis*, Lacertidae) abunda en el Pirineo oriental, y su comportamiento puede estudiarse fácilmente en los muros de piedra de campos abandonados. Sus manchas de colores en los flancos y el vientre resultan importantes para interactuar con sus congéneres, mientras que la coloración críptica del dorso dificulta su detección por parte de los depredadores.

Las manchas azules que observamos en los flancos reflejan, en realidad, la luz en el espectro ultravioleta (UV). Las coloraciones detectadas en este espectro combinadas con las percibidas en el espectro visible, como el blanco, el amarillo o el naranja del vientre, hacen a los animales más llamativos a ojos de sus semejantes. Las tonalidades del vientre pueden variar dentro de una misma población, donde a veces coexisten individuos con distintas coloraciones, denominados morfos.

Nuestra investigación se centra en explorar la función comunicativa de las manchas corporales en las interacciones sociales. Sabemos que la coloración azul-UV de los machos guarda relación con su condición física y con la fuerza de mordida, por lo que podría informar a otros machos sobre su capacidad para la lucha. Los que poseen vientre naranja tienden a perder los combates. Además, los machos y hembras con la misma coloración tienden a asociarse entre sí, por lo que parece que el morfo influye en la elección de pareja. Entender las señales cromáticas nos dará una información valiosa sobre cómo los organismos utilizan la comunicación para lidiar con las presiones selectivas a las que se ven sometidos en un entorno social muy competitivo.

—Javier Ábalos y Guillem Pérez i de Lanuza
ICB y Centro de Investigación en Biodiversidad y Recursos Genéticos, Universidad de Oporto
—Enrique Font
Instituto Cavanilles de Biodiversidad (ICB) Universidad de Valencia

ENRIQUE FONT (*fotografía en el ultravioleta*); JAVIER ÁBALOS (*resto de imágenes*)



LAS MANCHAS CLARAS LATERALES destacan respecto a las superficies corporales adyacentes, en esta fotografía tomada con un equipo sensible a la luz ultravioleta. Las lagartijas poseen la capacidad de ver en esta zona del espectro electromagnético.

ESTE MACHO de lagartija roquera presenta una vistosa coloración ventrolateral naranja que contrasta con el dorso críptico. Ello le permite exhibirse u ocultarse en función de la postura que adopte.



VIENTRES DE DISTINTOS COLORES. En una población pueden hallarse individuos de coloración roja (*R*), naranja (*N*), amarilla (*A*) y blanca (*B*), así como combinaciones de dos de estos colores. Los machos (*fila superior*) y las hembras (*fila inferior*) de un mismo color suelen aparearse entre sí. En las hembras la coloración suele estar limitada a la garganta, aunque no siempre.



LA GARGANTA es la parte donde la superficie ventral resulta más visible para otros congéneres. Cuando se comunican entre sí, los animales distienden esta zona o levantan la cabeza para exhibir su coloración.



por Carmen Caballero Navas

Carmen Caballero Navas es profesora de estudios hebreos en el departamento de estudios semíticos de la Universidad de Granada e investigadora de Duoda, el centro de investigación de mujeres de la Universidad de Barcelona y el Parque Científico de Barcelona.



Fertilidad, embarazo y atención al parto durante la Edad Media

La literatura medieval en hebreo sobre salud femenina refleja la pugna por excluir a las mujeres de la práctica médica legitimada

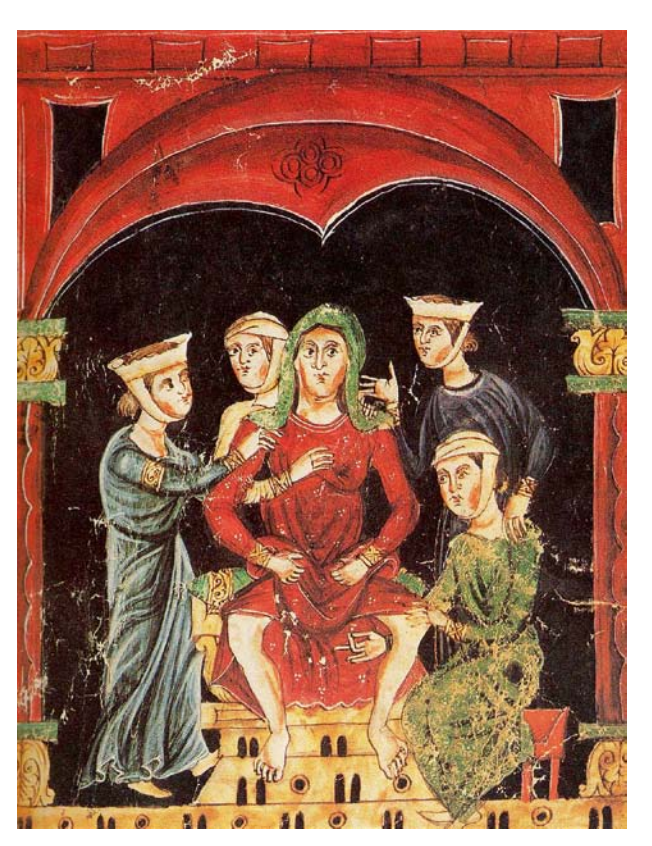
La *Memoria de las enfermedades que ocurren en los órganos de la generación* es una obra hebrea escrita en Castilla por un autor desconocido a fines del siglo XII o principios del XIII. Organizada en dos partes, dedica su segunda sección a las enfermedades de los órganos reproductivos femeninos. Su autor hace un recorrido por las dolencias relacionadas con el ciclo biológico femenino, explica su etiología, describe los síntomas y ofrece tratamientos; todo ello, de acuerdo con la teoría hipocrático-galénica de los humores. No falta en esta sección un apartado dedicado a las complicaciones del parto, en el que se exponen las distintas causas que pueden dificultarlo, así como las instrucciones que ha de recibir la comadrona —supuestamente del médico— para ayudar a la mujer y facilitar el nacimiento de la criatura.

Para la medicina medieval, hombres y mujeres poseen cuerpos anatómica y fisiológicamente distintos. Esta forma diferenciada de conceptualizar el cuerpo propicia la producción de un corpus de literatura médica que atiende a las peculiaridades y necesidades sanitarias de las mujeres. El siglo XII verá aparecer un género dedicado específicamente a la salud femenina, que circulará por el occidente europeo (en latín, lenguas vernáculas y hebreo) hasta finales de la Edad Media.

Los textos de este corpus están generalmente escritos en masculino y en ellos rara vez aparecen mujeres; cuando lo hacen, es de forma anónima o actuando bajo las órdenes de médicos. Esta ausencia de mujeres en las obras dedicadas a tratar dolencias femeninas resulta llamativa. Sobre todo, cuando algunos textos latinos y hebreos utilizan en sus prólogos el argumento de la modestia y la vergüenza femeninas —aduciendo que las enfermedades de muchas mujeres se agravan porque la modestia les impide mostrar a los médicos sus partes secretas— para justificar la escritura de un tratado sobre salud femenina.

Según el autor de la *Memoria de las enfermedades*, «si la causa de la retención del feto es su mala presentación, debes ordenar a la comadrona que lo devuelva a la posición correcta con sabiduría». Este ejemplo muestra la forma en que la literatura médica en hebreo entiende la práctica sanitaria de las mujeres, al subordinar su actividad a la del médico: ellas manipulan y palpan el cuerpo femenino, mientras el médico detenta el conocimiento teórico. Ello nos revela, además de la visión de los autores médicos sobre cómo debía ser la práctica médica femenina, un problema de nomenclatura y definición que se acentuó cuando las mujeres quedaron excluidas de las categorías profesionales del nuevo sistema médico legitimado por la institución universitaria.

Pero las mujeres no solo trataron a otras mujeres. A pesar de su lenta pero progresiva exclusión de la práctica médica legitimada, las necesidades sanitarias de la población permitieron la convivencia de distintos sistemas de salud en los que ellas participaron activamente. Además, no hay que olvidar que durante la Edad Media el cuidado sanitario se proporcionaba en gran medida en el ámbito doméstico, que no era definido como un espacio de curación, pero en el que se esperaba de las mujeres que cuidaran de la salud y trataran las enfermedades de su familia.



ESCENA DE PARTO en la que varias mujeres atienden a una parturienta y le administran semilla de cilantro para acelerarlo. Herbario de la primera mitad del siglo XIII. Sur de Italia.

Que el cuidado sanitario proporcionado por las mujeres en el ámbito doméstico abandonaba con frecuencia este espacio para adquirir carácter de ocupación ha quedado registrado en fuentes de diversa índole, desde la concesión de licencias para practicar, pasando por protocolos notariales que registran dedicación laboral, cartas reales, documentos eclesiásticos, actas de juicios, inscripciones funerarias, anécdotas y otras referencias directas e indirectas. Un testimonio no poco interesante que nos permite percibir el reconocimiento que pudo llegar a obtener su práctica en algunas ocasiones son las críticas que han dejado escritas prominentes médicos, mediante las que se quejan de que hombres y mujeres acudían a mujeres (generalmente ancianas) con el fin de conseguir una cura. Así se expresan, entre otros, Maimónides (1138-1204) en su *Tratado sobre el asma* y el autor desconocido de la enciclopedia médica *Sefer ha-yosher*, escrita en Provenza a fines del siglo XIII, que acusan a estas mujeres de carecer de conocimiento científico y avalar su práctica exclusivamente en la experiencia.

Consideraciones aparte sobre la extensión y el reconocimiento que tuvieran las prácticas médicas femeninas, ginecología y obstetricia son dos campos del saber en los que las mujeres detentan el monopolio casi absoluto hasta el siglo XVI. Durante la Edad Media, en la inmensa mayoría de los casos, el comienzo de la vida se encuentra inmerso en el mundo femenino. Las parturientas (judías, árabes y cristianas) eran atendidas en su casa por vecinas y comadronas.

Las comunidades judías del Mediterráneo occidental, que compartieron los sistemas médicos de las sociedades en cuyo seno vivieron, participaron también en la creación y difusión de la corriente de literatura dedicada al cuidado de la salud femenina. Se trata de textos médicos que establecen un continuo diálogo con la producción científica y filosófica del entorno, pero que también conversan con la propia tradición judía. En muchos de ellos percibimos una tensión entre las preocupaciones terapéuticas, el influjo de la filosofía natural y el peso de la *halajá* o ley judía. Esta literatura también refleja los intereses y preocupaciones de las propias mujeres en torno al cuidado de sus cuerpos, lo que puede observarse en la impronta que han dejado en algunos de ellos las prácticas locales femeninas.

Esos textos, por lo general anónimos y con escasas disquisiciones teóricas, van ofreciendo, a modo de recetarios, medidas y remedios a una serie de dolencias e incidencias relacionadas en gran medida con el ciclo biológico femenino. Entre todas estas preocupaciones sanitarias, la maternidad y todas las circunstancias conectadas con la fertilidad, el embarazo y el parto ocupan un lugar destacado. Por ejemplo, el *Libro de amor de mujeres*, una compilación anónima del siglo XIII, discute métodos para descubrir si una mujer es fértil, medios para quedarse embarazada y para prevenir el aborto, procedimientos para facilitar el parto y para extraer la placenta, tratamientos del dolor post-parto y para favorecer el flujo de la leche materna o cortarlo, y métodos para prevenir el embarazo y para abortar.

También el *Capítulo de mujeres*, un breve tratado del siglo XV de autoría desconocida, se ocupa de incidencias tales como la inflamación del vientre tras el parto, métodos para facilitar y acelerar el parto, procedimientos y medicinas para expulsar el feto muerto (o vivo), remedios para los dolores post-parto o tratamientos para facilitar la concepción. La centralidad de esta esfera de cuidado es tal que muchos tratados hebreos hacen referencia explícita a ella en sus títulos, en los que abundan alusiones directas a «concepción», «embarazo», «parto» o «esterilidad».

Pese al discurso androcéntrico que representa la actividad de las comadronas como subsidiaria de la del médico, los textos médicos también reconocen su experiencia y competencia. El mencionado pasaje de la *Memoria de las enfermedades* también reconoce la destreza y autonomía de la comadrona cuando, al tratar la retención del feto por mala presentación, explica que debe ser ella quien ha de manipularlo de acuerdo con su «sabiduría», para lo que utiliza el término hebreo *ḥokmah*, con el que también se designa a la «ciencia». No en vano la denominación *meyaledet* («comadrona») alterna en los textos médicos con *ishah ḥakamah* («mujer sabia»). Otras obras nos regalan ejemplos que, aunque parcos en datos, nos acercan a la práctica real de alguna mujer concreta. *Medicamentos para el embarazo*, del siglo XIV, alude a una mujer ismaelita, cuyo nombre no menciona, de la que el autor aprendió un sahumerio para el parto difícil.

De un lado, resulta llamativo constatar las escasas menciones a una ocupación que debió estar muy extendida dada la necesidad ininterrumpida de atención sanitaria que demandaba un episodio tan habitual en la vida de aproximadamente la mitad de la población durante su edad fértil. De otro, la misma cotidianidad de la labor que llevan a cabo estas mujeres, que se desarrolla en el ámbito del hogar y se comparte con otras vecinas y familiares, la hace casi invisible. Lo normal rara vez se nombra.

La experiencia y pericia de las comadronas judías parecen haber alcanzado una gran reputación entre sus contemporáneos, en vista del número de judías que atendían partos de cristianas. Aunque también se producía el caso contrario, mujeres judías cuyos alumbramientos eran administrados por cristianas. A pesar de los escrúpulos que expresaban y las prohibiciones que decretaban rabinos y autoridades eclesiásticas, judías y cristianas continuaron acudiendo unas a otras. La casa donde se daba a luz podía ser un «espacio privado» muy ruidoso y lleno de gente, del que generalmente estaban excluidos los hombres, pero al que se permitía la entrada a mujeres de otra religión.

PARA SABER MÁS

A history of jewish gynaecological texts in the Middle Ages. Ron Barkai. Brill, Leiden, 1998.
In pain you shall bear children (Gen. 3:16): Medieval prayers for a safe delivery. Marianne Elsakkers en *Women and miracle stories: A multidisciplinary exploration*, dirigido por Anne-Mary Korte. Brill, Leiden, págs. 179-207, 2001.
Administrar el parto y recibir la criatura. Aportación al estudio de la obstetricia bajomedieval. María del Carmen García Herrero en *Del nacer y el vivir. Fragmentos para una historia de la vida en la baja Edad Media*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, págs. 21-46, 2005.
«Como una madre, como una hija»: Las mujeres y los cuidados de la salud en la Baja Edad Media. Monserrat Cabré i Pairet en *Historia de las mujeres en España y América Latina. De la Prehistoria a la Edad Media*, dirigido por Isabel Morant. Cátedra, Madrid, págs. 637-657, 2005.
The trial of Floreta d'Ays (1403): Jews, Christians, and obstetrics in later medieval Marseille. Monica Green y Daniel Lord Smail en *Journal of Medieval History*, vol. 34, n.º 2, págs. 185-211, 2008.
She will give birth immediately: Pregnancy and childbirth in medieval Hebrew medical texts produced in the Mediterranean West. Carmen Caballero Navas en *Dynamis*, vol. 34, n.º 2, págs. 377-401, 2014.

por Alexandra Barratt



Alexandra Barratt es epidemióloga de la Universidad de Sídney.

Los riesgos de las mamografías

Los programas de cribado detectan algunos cánceres que en realidad entrañan escaso peligro. ¿Vale la pena someterse a unas exploraciones que pueden conllevar tratamientos agresivos e innecesarios?

Imagine una clínica especializada en cáncer de mama. En la sala de espera hay pacientes de 40 o 50 años y más mayores a quienes se les ha diagnosticado cáncer de mama a través de mamografías. Están asustadas y miran con inquietud a un futuro incierto. ¿Deberían todas ellas encontrarse en semejante situación? No. Algunas han sido «sobrediagnosticadas» y están a punto de recibir tratamiento para un cáncer que no habría causado ningún problema si no se hubiera detectado ni tratado.

En un escenario ideal, las mamografías rutinarias detectarían cánceres potencialmente mortales antes de que causaran síntomas como un bulto. Ello mejoraría el tratamiento y reduciría las muertes tempranas. Esta es la premisa de los programas de cribado. Pero el cuadro es mucho más complejo.

El cáncer de mama toma numerosas formas, desde algunas indolentes e inofensivas, a otras muy agresivas y mortales. Dado que las mamografías son fotos de un momento concreto, es más probable detectar un cáncer de crecimiento lento que uno de crecimiento rápido. Debido a esta tendencia a detectar cánceres con poca probabilidad de ser dañinos, esta técnica causa sobrediagnóstico.

Como mujer de 50 años, tengo dos opciones: someterme a exámenes periódicos o no hacerlo. Para decidir, necesito tener en cuenta las posibles consecuencias. Puede que mis mamografías sean siempre normales. O puede que una no sea normal y me realicen otras pruebas que demuestren que no tengo cáncer (falso positivo). Si me someto a pruebas regularmente durante veinte años, tengo más de un 40 % de posibilidades de sufrir uno de estos sustos. Me causaría una ansiedad importante, y puede que me llevara cierto tiempo recuperarme, pero no creo que dejara de examinarme solo por la posibilidad de una falsa alarma. La tercera posibilidad es que me diagnosticaran cáncer de mama. En este caso me aconsejarían someterme a cirugía (extirpar el cáncer o la mama entera) y, probablemente, a radioterapia, junto con terapia hormonal durante 5 o más años.

Entonces ¿por qué me planteo no examinarme? ¿No me asusta poder morir de cáncer? Sí, por supuesto. Pero también me preocupa la posibilidad de sufrir un daño grave por el tratamiento de un cáncer que nunca habría afectado a mi salud.

La radioterapia aumentará mi riesgo de sufrir una enfermedad cardíaca, sobre todo si el cáncer está a la izquierda, cerca del corazón —la enfermedad cardiovascular mató a mi madre y a tres de mis abuelos, de modo que esta es una preocupación importante para mí—. Casi con certeza experimentaría algunos de los efectos secundarios de la terapia hormonal (problemas de humor, libido baja y sequedad vaginal) y un riesgo mayor de coágulos sanguíneos e ictus. Mis dos hijas sufrirían ansiedad y, por siempre jamás, tendrían «antecedentes familiares de cáncer de mama». El impacto psicológico y los riesgos físicos de ser tratada de un cáncer sobrediagnosticado comenzarían inmediatamente. Y según me hago mayor, creo que tener buena salud y gozar de mi vida en el presente es cada vez más importante que el futuro.

En la actualidad, no es posible identificar un cáncer sobrediagnosticado a nivel individual porque no existen pruebas que permitan distinguir los cánceres de mama que causarán problemas de salud de los que no lo harán. La sobrediagnosis solo puede deducirse a partir de estadísticas poblacionales, así que yo nunca podría estar segura de si mi caso era de este tipo. Y creo que no estoy dispuesta a abrir esta caja de Pandora. Este es el enigma fundamental de la sobrediagnosis, y la única manera de evitarla es no sometiéndome a la exploración.

También podría acceder al examen médico por la pequeña probabilidad de que ello me evite morir de cáncer. Sin embargo, algunas estimaciones apuntan a que examinar a 1000 mujeres durante 20 años puede prevenir 4 muertes por cáncer de mama. Algunas estimaciones son incluso más bajas. Eso significa que hay apenas un 0,4 % de casos en que la mamografía marcará la diferencia entre morir o no. Es por tanto más probable que se me sobrediagnostique que me salven la vida.

Para entendernos, si decido no someterme a exploraciones no estoy pretendiendo ignorar que el cáncer de mama existe. Si noto un cambio en mis pechos, como un bulto, acudiré al médico sin dudarlo; y si en el futuro la investigación sobre el cribado cambia, meditaré cuidadosamente la nueva información. Pero por ahora, haré lo que esté en mi mano para reducir al mínimo mi riesgo de cáncer de mama controlando mi peso, haciendo ejercicio y moderando mi consumo de alcohol.

Mi decisión no pretende determinar la de otras mujeres, ya que cada una tiene diferente cuerpo, familia, circunstancias, preferencias y miedos. Lo que realmente importa es que todas tengamos acceso a la mejor información que la ciencia puede proporcionarnos para elegir lo que más nos conviene.

Artículo original publicado en *Nature* 527, pág. S104, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

Con la colaboración de nature



Wajahat Z. Mehal dirige proyectos científicos sobre la inflamación y atiende a pacientes con enfermedades hepáticas en el Centro Médico del Departamento de Veteranos de West Haven, en Connecticut, y en la Universidad Yale.



MEDICINA

LA MAQUINARIA CELULAR DE LA INFLAMACIÓN

El descubrimiento reciente de una estructura en las células responsable de la respuesta inflamatoria puede dar lugar a nuevos tratamientos contra enfermedades tan diversas como la ateroesclerosis, el alzhéimer o el hígado graso

Wajahat Z. Mehal

Cualquiera que haya tenido una espinilla está familiarizado con el enrojecimiento de los tejidos, la hinchazón, la sensación de calor y el dolor que caracterizan una infección. Tal respuesta, denominada inflamación, se conoce desde la antigüedad. Pero el proceso, que a menudo es iniciado por las células del sistema inmunitario, también puede producirse cada vez que un tejido resulta dañado, incluso en ausencia de un microorganismo patógeno, como cuando nos golpeamos un dedo del pie o, en casos más graves, cuando se sufre un ataque cardíaco. Este segundo tipo de reacción se denomina inflamación estéril y, cuando se descontrola, contribuye a la aparición de una amplia gama de enfermedades en apariencia poco relacionadas entre sí, como el alzhéimer, la diabetes o diversos trastornos hepáticos.

EN SÍNTESIS

Durante mucho tiempo, el enrojecimiento de la piel, la hinchazón, la sensación de calor y el dolor han sido las características distintivas de la inflamación, que puede ser causada por una infección o una lesión en un tejido.

En los últimos años, se ha descubierto que las células producen ciertos complejos moleculares, denominados inflamasomas, que ponen en marcha el proceso.

De modo sorprendente, numerosas enfermedades aparentemente no relacionadas entre sí, como el alzhéimer, la gota o las cardiopatías, comparten los mismos inflamasomas.

Se espera que los recientes hallazgos ayuden a desarrollar fármacos que en el futuro permitan tratar con mayor eficacia una amplia gama de enfermedades crónicas.

BRIAN STAUFFER

Aunque la inflamación crónica y su influencia en las enfermedades se conocen desde hace décadas, las investigaciones de los últimos años han aportado sorprendentes e importantes descubrimientos sobre su origen. Uno de los más fascinantes es que no se trata de una reacción automática, sino que, para ponerse en marcha, requiere el ensamblaje activo de ciertas estructuras moleculares. Las células implicadas en la inflamación construyen en poco tiempo esas estructuras, denominadas inflamasomas, que después desmontan con rapidez, normalmente un día después de haberse producido una lesión. Parece que este rápido desmontaje evita daños excesivos en el organismo. Una inflamación moderada resulta beneficiosa porque destruye los patógenos e impide su propagación por todo el cuerpo. Pero, si es exagerada, puede deteriorar tejidos vecinos sanos y favorecer la extensión de cualquier lesión inicial.

El descubrimiento del inflamasoma resulta interesante por sí mismo para los biólogos, pero también tiene profundas repercusiones en el campo de la medicina. Se ha comprobado que las alteraciones en el ciclo de montaje y desmontaje pueden empeorar una inflamación en curso. Hoy en día, muchos de los medicamentos utilizados contra el dolor y la inflamación bloquean la actividad de determinadas proteínas que ayudan a extender la inflamación. Pero las nuevas investigaciones sugieren que los fármacos que impiden la formación del inflamasoma o estimulan su desmontaje podrían evitar la posterior síntesis de esas proteínas problemáticas y, con ello, reducir el daño del tejido de una forma totalmente nueva. Este tipo de medicamentos, solos o combinados con otros ya existentes, deberían ayudar a combatir las inflamaciones que no responden a los tratamientos.

De hecho, los últimos hallazgos sobre el modo en que los inflamasomas funcionan a veces de forma acelerada están haciendo cambiar por completo nuestra manera de pensar acerca de las enfermedades humanas. Opinamos que, en vez de clasificar estas sobre la base de los órganos afectados (corazón o hígado), resulta más apropiado hacerlo en función de la maquinaria celular que está fallando. Hasta ahora se han caracterizado cuatro variedades de inflamasomas, y probablemente se descubran más. Una ventaja de este cambio de estrategia es la posibilidad de estudiar, pongamos por caso, si los fármacos contra la gota, en la que se ha activado un tipo concreto de inflamasoma, también podrían servir para tratar las cardiopatías provocadas por el mismo tipo de inflamasoma.

SEÑALES FORÁNEAS Y PROPIAS

La respuesta inflamatoria forma parte del sistema inmunitario innato, aquel que suele relacionarse con la primera línea de defensa contra los patógenos que invaden el organismo. En ella, ciertos leucocitos denominados macrófagos, u otros parecidos, se dirigen al lugar de la infección y liberan allí unas proteínas que inducen la hinchazón y el calor necesarios para inmovilizar y debilitar los microbios; las secreciones favorecen también la llegada de aún más células inmunitarias a la zona. (El pus que se observa en las heridas infectadas está formado por este tipo de leucocitos.)

Durante años se pensaba que el sistema innato iniciaba esa cascada de reacciones únicamente al distinguir «lo propio» de «lo ajeno». Los macrófagos reconocen determinadas moléculas que suelen hallarse en numerosos patógenos, pero no en las personas ni en otros vertebrados. Tras establecer contacto con tales moléculas, los macrófagos liberan las proteínas que desencadenan el resto de la respuesta inflamatoria. Las moléculas ajenas al organismo y que solo están presentes en el patógeno se denominan coloquialmente «señales foráneas». Charles Janeway Jr. y Ruslan M. Medzhitov, ambos de la Universidad Yale, sentaron las bases de esta idea a finales de los años ochenta y mediados de los noventa [*véase* «Reconocimiento inmunitario de cuerpos extraños», por Ch. A. Janeway Jr.; Investigación y Ciencia, noviembre de 1993].

Sin embargo, más tarde se comprobó que los macrófagos mostraban una extraordinaria reactividad hacia determinadas moléculas sintetizadas por el propio organismo, como el ATP (que en las células funciona como una suerte de batería química recargable) o el material hereditario del ADN y el ARN. Normalmente, estas moléculas están guardadas a buen recaudo en el interior de varios compartimentos celulares para que no sean alcanzadas por cualquier protrusión tentacular de los macrófagos. Pero si tales sustancias llegan a los espacios que hay entre las células (algo que podría suceder cuando nos golpeamos accidentalmente el pulgar con un martillo) pueden ser detectadas por unas proteínas denominadas receptores de tipo *Toll* o por otras moléculas de las células inmunitarias. Para evitar riesgos, nuestro organismo responde a estas señales de peligro y, al dar por sentado que también hay patógenos alrededor, pone en marcha la misma respuesta inflamatoria que inducen los microbios.

Tal reacción en cadena entraña graves consecuencias. La más importante es que, si no se desactiva cuando deja de ser necesaria, puede hacer que se extienda aún más la lesión en el tejido.

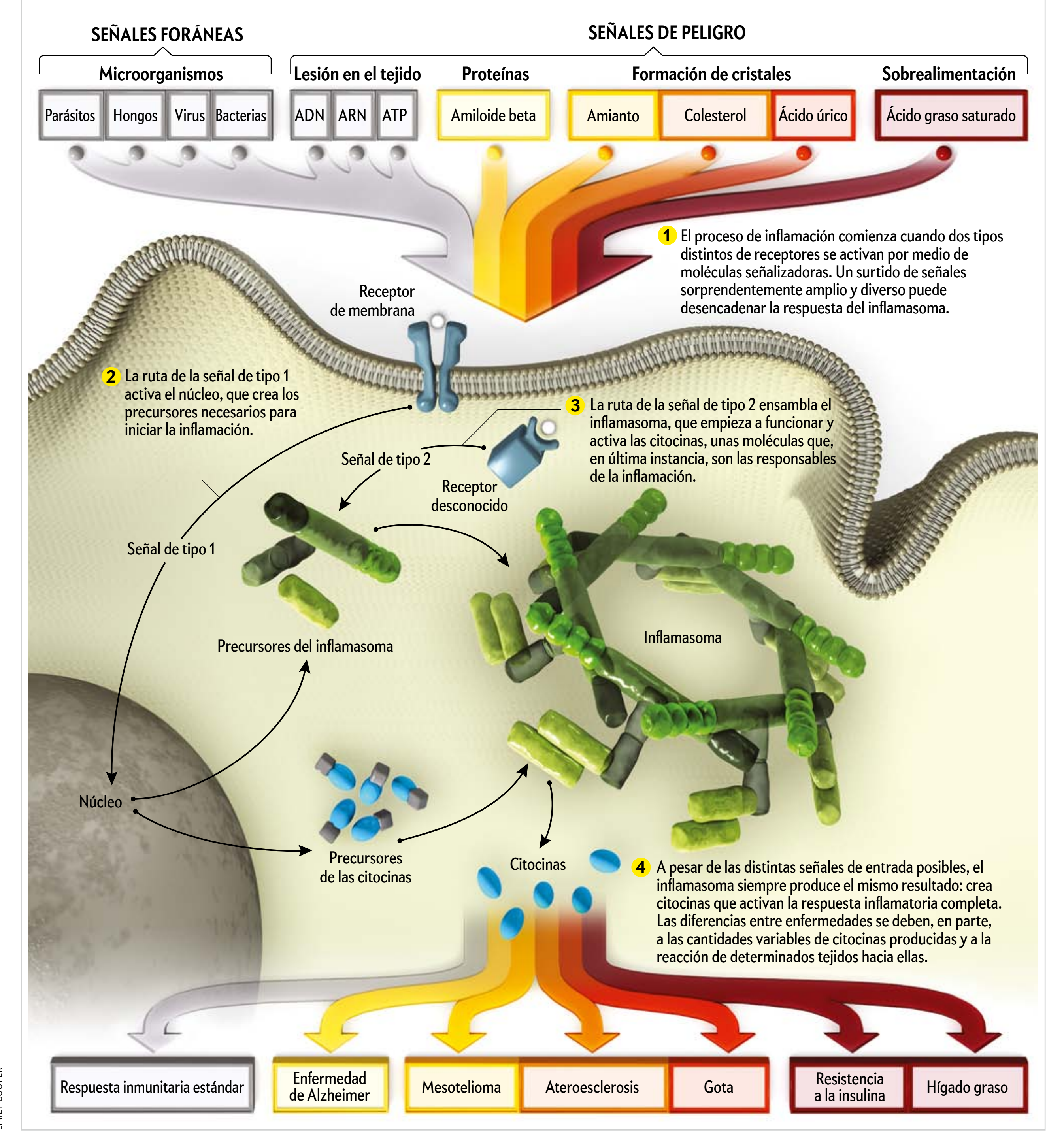
ENTUSIASMO CRECIENTE

Aunque las líneas generales de la respuesta inflamatoria se establecieron hace más de quince años, durante la última década los investigadores han ido descubriendo con entusiasmo nuevos detalles sobre lo que sucede en el interior de un macrófago antes de que este ponga en marcha una reacción defensiva tan potente. Antes se pensaba que para conocer en profundidad el modo en que se desarrolla una infección debían identificarse cientos de señales moleculares en las que intervendrían varias docenas de tipos celulares, entre ellos los macrófagos. Sin embargo, al centrarse los estudios solo en estos últimos, pronto se comprobó que únicamente se necesitaban unas pocas secuencias de interacciones moleculares, o rutas, para dar la alarma inicial. Además, había otras células que utilizaban esas mismas rutas. Al saber ahora que solo es necesario investigar unas cuantas reacciones, se espera poder desarrollar un puñado de medicamentos que bloqueen por completo la producción de inflamasomas o que promuevan su desmontaje en una amplia gama de enfermedades.

¿Qué ocurre entonces en el interior de los macrófagos? De entrada, cualquier macrófago que se halle cerca de células dañadas se ve rodeado por numerosos fragmentos rotos de ADN y ARN, así como de otras sustancias indicadoras de peligro (también conocidas como DAMP, siglas inglesas de «patrones moleculares relacionados con un peligro»). Algunas de estas sustancias se unen a cierta proteína situada en la superficie externa del macrófago, mientras que otras hacen lo propio con otra molécula cuya identidad y localización todavía se están investigando. Después de tal unión, estos receptores activan uno de los dos siguientes procesos celulares: el primero (denominado ruta de la señal de tipo 1) promueve la síntesis de determinadas moléculas necesarias para iniciar la inflamación, mientras que el segundo (la ruta de la señal de tipo 2) construye un inflamasoma. Este último, una vez formado, procesa las moléculas inflamatorias recién sintetizadas de modo que las activa y, a continuación, mediante un mecanismo aún no identificado, las libera fuera del macrófago.

Cómo se propaga la inflamación

Para sorpresa de los investigadores, todas las células del organismo inician la inflamación de la misma forma: construyen una estructura molecular, el inflamasoma, que libera unas sustancias denominadas citocinas. Estas suelen provocar una respuesta inflamatoria estándar de corta duración que se caracteriza por un enrojecimiento de la piel, hinchazón, dolor y sensación de calor. Pero si un inflamasoma permanece activo demasiado tiempo, pueden aparecer distintas enfermedades (como el alzhéimer o la gota), dependiendo de factores tales como la cantidad de citocinas producidas y de la reacción que provocan estas en distintos tejidos. Entre las sustancias que activan este proceso se incluyen las señales foráneas (producidas por microorganismos) y las señales de peligro (producidas por el propio cuerpo cuando este sufre una lesión). El descubrimiento de una ruta molecular común permitiría a las compañías farmacéuticas desarrollar nuevos medicamentos contra enfermedades que, hasta ahora, parecían no guardar relación alguna entre sí.



EMILY COOPER

En contra de lo que cabría esperar, los productos generados por el inflamasoma son bastante limitados, independientemente de que su ensamblaje haya sido iniciado por señales foráneas o de peligro. Los cuatro tipos de estructuras inflamatorias descritas hasta la fecha producen y liberan básicamente dos sustancias: la interleucina-1 beta (IL-1β) y la interleucina-18 (IL-18). Se sabía que tales sustancias, pertenecientes a un grupo de moléculas señalizadoras denominadas citocinas, intervienen en la inflamación. Pero antes del descubrimiento de los inflamasomas se ignoraba cómo se originaban. Tras ser liberadas, las interleucinas se propagan por todo el tejido y desencadenan la síntesis de aún más citocinas, lo que estimula el riego sanguíneo local, el reclutamiento de otras células inmunitarias y una serie de cambios que, de forma conjunta, constituyen la respuesta inflamatoria completa.

Pero todavía llegarían más sorpresas. Una investigación tras otra empezaban a demostrar que los inflamasomas se hallaban en el origen de un amplio abanico de enfermedades y trastornos en los que se creía que la inflamación desempeñaba, en el mejor de los casos, un papel secundario. De hecho, los inflamasomas se pueden construir en todo tipo de células, no solo en los macrófagos y otras células inmunitarias. (Por ejemplo, ciertas células del intestino construyen inflamasomas cuya liberación de citocinas desencadena la producción de moco en respuesta a señales foráneas o de peligro.) Además, se descubrió que la formación de partículas microscópicas daba lugar a diversas enfermedades en distintas partes del organismo. Se comprobó que cierto tipo de inflamasoma presente en distintos tipos de células, denominado NLRP3, parecía contribuir a la inflamación causada por estos depósitos, ya fueran de amianto en los pulmones (mesotelioma) o de ácido úrico en las articulaciones (gota). De hecho, los datos actuales sugieren que el colesterol *per se* no provoca los cambios ateroescleróticos en las arterias que pueden dar lugar a un infarto de miocardio o a una apoplejía, sino su tendencia a agregarse y formar cristales en las paredes de los vasos sanguíneos. De manera similar, en la enfermedad de Alzheimer la acumulación del complejo proteico de amiloide beta en el espacio que separa las neuronas activa el inflamasoma NLRP3 de las células de la microglía (el equivalente de los macrófagos en el cerebro) y ello provoca la muerte de las neuronas. De este modo, un conjunto diverso de sustancias (ácido úrico, colesterol, amiloide beta, amianto y otras) origina un espectro de enfermedades que afectan a distintos órganos y evolucionan de manera diferente, pero que dependen todas ellas de la maquinaria del inflamasoma.

INFLAMACIÓN ASOCIADA A LA ALIMENTACIÓN

En mi opinión, la verdadera sorpresa en este campo fue descubrir que el mero hecho de comer puede desencadenar una respuesta inflamatoria. En concreto, comer en exceso de una sentada provoca un episodio agudo de inflamación que acaba desapareciendo por sí solo; y si se tiene el hábito de ingerir tantas calorías como para obligar al organismo a almacenarlas en forma de grasa, se producirá una inflamación crónica. Los biólogos no tenían muchos motivos para sospechar una conexión de este tipo. Después de todo, los nutrientes no son moléculas o partículas específicas de las bacterias, ni tampoco permanecen secuestrados en el interior de las células (lo que los convertiría en señales claras de peligro). Además, varios estudios llevados a cabo en los últimos años con animales han puesto de manifiesto que ciertos nutrientes, como los ácidos grasos saturados (presentes en la carne o el queso y que también son sintetizados por nuestro organismo), cuando son muy abundantes actúan como señales de peligro y activan directamente el inflamasoma NLRP3 en macrófagos y otras células. Este descubrimiento ha abierto un área de investigación nueva para determinar los efectos que ejercen ciertos metabolitos (productos de la digestión) sobre la actividad de los inflamasomas. Se ha comprobado así que el consumo excesivo de carbohidratos u otros nutrientes provoca indirectamente inflamación, ya que el organismo primero tiene que convertir el sobrante en moléculas de ácidos grasos.

Aunque la inflamación asociada a la alimentación excesiva afecta a numerosos órganos, la respuesta más fuerte se ha observado en el hígado, probablemente en parte porque este órgano absorbe gran cantidad de ácidos grasos. Además, el hígado sano contiene muchas células inmunitarias que están listas para ser activadas y que pueden causar daños hepáticos incluso tras una leve estimulación. En conjunto, estos procesos pueden hacer que el órgano se hinche y se inflame, y ello provoca lo que los médicos denominan esteatosis hepática, o hígado graso. Aunque el mal es reversible, a menudo sus signos se confunden con los observados en el hígado de personas alcohólicas. (Por razones que no se acaban de entender, a veces la esteatosis hepática deriva en cirrosis, la cual puede resultar mortal.)

Las diferencias entre enfermedades se deben al tipo de señal iniciadora, así como al lugar donde se activa el inflamasoma y su duración

A ese hallazgo, ya bastante inquietante por sí solo, hay que añadirle el hecho de que, hoy en día, hasta una tercera parte de los niños obesos padecen esteatosis hepática. Ello aumenta la posibilidad de que, al menos algunos de ellos, acaben sufriendo cirrosis al inicio de la etapa adulta. De este modo, un gran número de preadolescentes podría padecer hepatopatía alcohólica, con la diferencia de que, en este caso, el factor causante no sería el alcohol sino un exceso de calorías. Si, tal y como indican los estudios con animales, el inflamasoma NLRP3 interviene en la inflamación relacionada con la alimentación, cabría esperar entonces que un tratamiento que impidiera la construcción del inflamasoma limitaría la inflamación y las lesiones hepáticas en personas obesas o con sobrepeso. En defensa de esta idea, se ha demostrado que los ratones obesos carentes de los componentes del inflamasoma presentan un hígado más sano, aunque son más propensos a la infección.

Dado que la sobrealimentación puede causar inflamación, mi equipo de la Universidad Yale decidió abordar la cuestión contraria: ¿puede la desnutrición generar metabolitos que reduzcan la activación del inflamasoma? Los efectos antiinflamatorios del

ayuno y del ejercicio físico son bien conocidos, de modo que investigamos dos moléculas cuya concentración aumenta en todo el organismo durante tales estados: el beta-hidroxibutirato y el ácido láctico. Descubrimos que cada una de ellas interacciona con un tipo de receptor distinto de los macrófagos; de forma conjunta, estas interacciones inician una serie de reacciones bioquímicas en el interior de las células que, en última instancia, desactivan los genes responsables de la formación de inflamasomas. Nuestro próximo reto consiste en hallar la forma de aprovechar estas rutas paliativas para que anulen la inflamación en diversas enfermedades.

INFLAMACIÓN CRÓNICA

El primer paso para determinar cómo desarmar el inflamasoma es averiguar el modo en que lo hace el organismo de manera natural, un proceso que suele ponerse en marcha entre 18 y 24 horas después de haberse construido tal estructura. Al mismo tiempo, se espera identificar las rutas moleculares que permiten a los inflamasomas funcionar más tiempo del debido en diversas enfermedades. Esos conocimientos deberían sugerir formas de desactivar los que permanecen activos de forma anómala.

Los estudios indican que todas las señales de peligro conocidas (las de tipo 1 y las de tipo 2) dan lugar a un episodio corto de inflamación a pesar de que estas persistan en el espacio intercelular. Al cabo de un tiempo, las células inmunitarias sencillamente dejan de responder a la presencia prolongada de las señales de tipo 1 (las que estimulan la síntesis de ciertas sustancias) mediante un proceso denominado tolerancia. Por el contrario, las señales de tipo 2 (las que dan lugar a la formación del inflamasoma en sí mismo) inducen la muerte de las células inmunitarias cuando estas llevan demasiado tiempo en la zona. Como resultado de cualquiera de ambos casos, el proceso inflamatorio se detiene.

Queda claro, entonces, que se necesitan señales adicionales para mantener un inflamasoma activado durante un tiempo prolongado, tal y como ocurre en la diabetes y en la esteatosis hepática. Mi grupo, en colaboración con otros, ha demostrado que la adenosina (una sustancia que produce el organismo cada vez que descompone las moléculas de ATP para obtener energía) parece demorar el desmantelamiento del inflamasoma NLRP3. Irónicamente, durante mucho tiempo la adenosina ha sido considerada una molécula antiinflamatoria, ya que contrarresta otros productos que se generan más tarde durante el proceso inflamatorio.

TRATAMIENTOS FUTUROS

Los descubrimientos resumidos en este artículo han cambiado drásticamente la idea que tenemos de la inflamación. Además de haberse identificado los distintos pasos del proceso, en general hoy se acepta que diferentes estímulos (señales foráneas, señales de peligro e incluso muchos de los productos normales de la descomposición de los alimentos) convergen en una única factoría inflamatoria (el inflamasoma) que genera un número reducido de moléculas. Las diferencias entre las enfermedades se deben al tipo de señal iniciadora, así como al lugar donde se activa el inflamasoma y su duración. Por ejemplo, los cristales de ácido úrico de las articulaciones desencadenan episodios de inflamación aguda (la gota), que desaparecen a pesar de la persistencia de los cristales (por lo menos hasta el próximo ataque); en cambio, los cristales de sílice en los pulmones dan lugar a una inflamación crónica, seguida de un proceso de cicatrización.

Los nuevos conocimientos han desvelado algunas dianas moleculares contra las que podrían actuar los futuros medicamentos. La estrategia consiste en inhibir distintas etapas de la construcción del inflamasoma, como la unión de las señales de peligro a sus receptores. Diversas compañías farmacéuticas ya han iniciado experimentos con distintos compuestos que actúan directamente sobre el inflamasoma. Pero probablemente deberemos esperar al menos una década para que se determine con ensayos clínicos la seguridad y eficacia de estos posibles fármacos.

Mientras tanto, numerosos investigadores han empezado a experimentar con tratamientos que ya son eficaces contra una enfermedad (y que han sido aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU.) en individuos que padecen distintos trastornos pero que comparten el mismo tipo de inflamasoma. De este modo, el fármaco anakinra, utilizado durante mucho tiempo para tratar la artritis reumatoide, bloquea el receptor al que se une la IL-1β nada más abandonar el inflamasoma, por lo que este medicamento se está ensayando ahora en una amplia gama de enfermedades impulsadas por NLRP3, entre las que se incluyen unos cuantos síndromes inflamatorios raros que debilitan a los niños.

Mi grupo también está investigando si la digoxina, un fármaco que suele emplearse para tratar ciertos trastornos del ritmo cardíaco, podría reducir la inflamación en el caso de enfermedades neurológicas como el alzhéimer. Otros investigadores han demostrado hace poco que la digoxina inhibe una molécula denominada HIF-1α. Más tarde, mi grupo de Yale ha determinado que se necesita tal molécula para la activación prolongada del inflamasoma NLRP3. Debido a que el NLRP3 parece mantenerse activo en el cerebro de los pacientes con alzhéimer, nuestros resultados conjuntos nos hacen pensar que la digoxina podría utilizarse para tratar esta enfermedad, aunque todavía faltan muchos estudios para confirmarlo. Se ha demostrado que un exceso del fármaco provoca confusión y otros síntomas que imitan la demencia, y además puede producir otros efectos secundarios.

En los últimos años, las investigaciones sobre la biología básica del inflamasoma han proliferado de forma espectacular. Sin duda, el febrero próximo arrojará nuevos conocimientos, y quizá también tratamientos, de una manera que hoy no se puede prever del todo. Pero la rica y compleja organización de esta sorprendente maquinaria celular deja claro que si se aborda el problema de la inflamación desde su origen se podría aliviar en mayor medida el sufrimiento y la incapacidad que complican la vida de tantas personas.

PARA SABER MÁS

The inflammasomes. Kate Schroder y Jurg Tschopp en *Cell*, vol. 140, n.º 6, págs. 821-832, 19 de marzo de 2010. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20303873**
Inflammasomes in health and disease. Till Strowig et al. en *Nature*, vol. 481, págs. 278-286, 19 de enero de 2012.
Inflammasome biology in fibrogenesis. Xinshou Ouyang, Ayaz Ghani y Wajahat Z. Mehal en *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease*, vol. 1832, n.º 7, págs. 979-988, julio de 2013. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23562491**

EN NUESTRO ARCHIVO

Función maligna de la inflamación. Gary Stix en *IyC*, septiembre de 2007.
Medicina bioelectrónica. Kevin J. Tracey en *IyC*, junio de 2015.



PASCAL MOLLE

INGENIERÍA AMBIENTAL

DEPURACIÓN NATURAL

Los humedales construidos permiten tratar el agua de forma integrada con el entorno y con un coste energético nulo. Su aplicación en los países en vías de desarrollo está permitiendo abordar desde una nueva perspectiva la escasez de saneamiento en el mundo

Cristina Ávila, Víctor Matamoros y Joan García



PLANTA DE TRATAMIENTO de aguas residuales basada en humedales construidos en la localidad francesa de Evieu. Estos sistemas han demostrado ser idóneos para la depuración del agua en zonas rurales y descentralizadas.

DE AGUAS RESIDUALES

EN SÍNTESIS

La depuración tradicional del agua requiere extensos sistemas de captación que redirigen las aguas residuales a una planta centralizada. Dicha técnica resulta poco apropiada para su implantación en zonas rurales y países pobres.

Un método alternativo lo ofrecen los humedales construidos. Estos sistemas imitan a los humedales naturales, pero su estructura y vegetación se escogen para potenciar los procesos que intervienen en la depuración del agua.

Los humedales construidos permiten tratar el agua de forma no centralizada y adaptada al entorno. Funcionan especialmente bien en climas tropicales y han mostrado una gran eficiencia en la eliminación de contaminantes emergentes.

Cristina Ávila es investigadora posdoctoral en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). En la actualidad gestiona un proyecto europeo de colaboración con India para abordar el tratamiento del agua residual en pequeñas poblaciones mediante técnicas naturales de bajo coste.

Víctor Matamoros investiga en el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del CSIC, en Barcelona. Su trabajo se centra en técnicas de fitorremediación para disminuir la presencia de contaminantes emergentes en el medio acuático.

Joan García lidera el Grupo de Ingeniería Ambiental y Microbiología de la UPC. Es experto en sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales.

La Tierra dispone de suficiente agua dulce para satisfacer las necesidades de toda la población. Sin embargo, según datos de 2015, el 10 por ciento de los habitantes del planeta sigue sin disponer de agua potable segura y cerca del 40 por ciento carece de infraestructuras de saneamiento básicas. Se calcula que la escasez de estos servicios provoca la muerte de un millón y medio de niños al año, razón por la que, en 2010, las Naciones Unidas declararon el acceso al agua potable y el saneamiento derechos humanos fundamentales.

A pesar de los avances logrados durante los últimos años, la falta de saneamiento afecta hoy a unos 2500 millones de personas en todo el mundo. Este problema recae principalmente sobre los entornos rurales, donde viven el 70 por ciento de quienes carecen de saneamiento y el 90 por ciento de quienes practican la defecación al aire libre, un hábito que comporta graves riesgos de salud pública.

Sin embargo, el modelo de tratamiento de aguas empleado en la mayor parte del mundo difícilmente puede implantarse en áreas rurales o en países en vías de desarrollo. Dicho modelo se basa en extensos sistemas de captación que redirigen las aguas residuales hacia una planta centralizada, lo que suele requerir procesos de alta complejidad, un elevado coste económico y el consumo de grandes cantidades de energía. De hecho, el sector de la depuración ocupa a algunas de las mayores empresas del mundo y mueve abultadas cifras. Los operadores europeos de aguas residuales urbanas gestionan más de 2,2 millones de kilómetros de conducciones de alcantarillado y cerca de 70.000 plantas depuradoras. Y se estima que, en EE.UU., el tratamiento del agua consume hasta un 3 por ciento de la energía eléctrica producida en el país.

Es cierto que, en los grandes núcleos urbanos de los países industrializados, las elevadas exigencias de depuración, el escaso espacio disponible y el vasto caudal de agua que debe tratarse hacen insustituibles los sistemas al uso. A pequeña escala, sin embargo, resulta imprescindible un cambio de modelo. Es necesario desarrollar técnicas que puedan adaptarse al entorno natural, social y económico de cada región; que tengan unos costes de implantación y operación mucho menores, y que se caractericen por un mantenimiento simple y un enfoque descentralizado, con un tratamiento del agua en el lugar de origen.

Una oportunidad excelente para propiciar dicha transición la ofrecen los humedales construidos. Estos sistemas remedan los humedales naturales, pero su diseño y modo de operación se escogen para potenciar los procesos biológicos y fisicoquímicos que intervienen en la depuración del agua. Pueden construirse con materiales y mano de obra locales, por lo que resultan idóneos para pequeños núcleos de población y áreas descentralizadas. Además, dado que se basan en el conocimiento del medio natural, son especialmente adecuados para los países en vías de desarrollo, puesto que no generan una excesiva dependencia tecnológica.

El mantenimiento de los humedales construidos es sencillo, económico y presenta varios beneficios ambientales. Estos sistemas gozan de un consumo energético nulo (se bastan con la luz del sol), generan pocos lodos residuales y no requieren la adición de reactivos químicos. Además, por su condición de infraestructura verde, proveen hábitats para la vida salvaje, con las consiguientes ventajas en términos de biodiversidad y restauración de zonas degradadas. Estos sistemas son resilientes a grandes fluctuaciones en la calidad y la cantidad del agua, así como a las variaciones de la temperatura ambiental. Y aunque se trata de una técnica relativamente reciente en comparación con otras más extendidas, como los fangos activados, han demostrado una gran eficiencia en la eliminación de un amplio espectro de contaminantes, incluidos algunos que se resisten al tratamiento ordinario.

ADAPTADOS AL ENTORNO

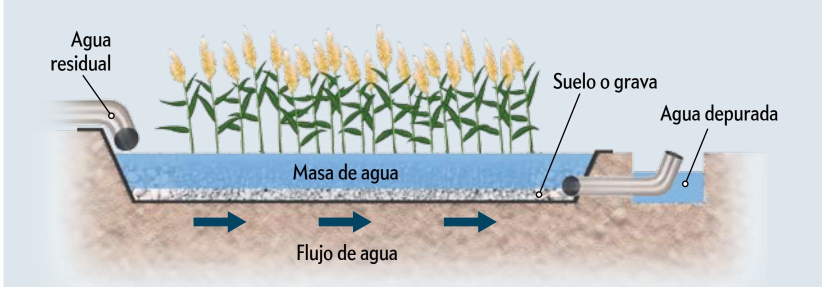
La técnica usada actualmente en la mayor parte del mundo para depurar aguas residuales incluye tres fases: pretratamiento, donde se separan los sólidos de gran tamaño; tratamiento primario, consistente en la sedimentación de los sólidos que aún persisten; y tratamiento secundario, o biológico, en el que los microorganismos descomponen y eliminan la materia orgánica disuelta. La depuración tradicional genera en mayor o menor medida fangos, que, a su vez, deben ser tratados para su acondicionamiento y destino final, lo que conlleva un coste elevado. Si se desea conseguir un agua depurada de gran calidad, puede

Otra forma de tratar el agua

Los humedales construidos permiten depurar el agua de forma integrada con el medio natural. Su vegetación y estructura se eligen de manera que la interacción entre el agua, la arena o grava y los microorganismos potencien los procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la eliminación de patógenos y contaminantes. Estos sistemas resultan aptos para el tratamiento secundario y terciario de las aguas residuales (*arriba*). En función de su estructura y funcionamiento, pueden clasificarse en dos grandes tipos (*abajo*): de flujo superficial y de flujo subsuperficial.



La depuración de aguas residuales incluye tres fases principales. Durante el pretratamiento se separan los sólidos de gran tamaño. Después, un tratamiento primario se encarga de la sedimentación de los sólidos que aún persisten. Por último, el tratamiento secundario, o biológico, elimina los microorganismos y la materia orgánica disuelta. En ocasiones se emplea un tratamiento terciario (*no mostrado*) para afinar aún más la calidad del agua, lo que permite reutilizarla para determinados fines urbanos, agrícolas o industriales.

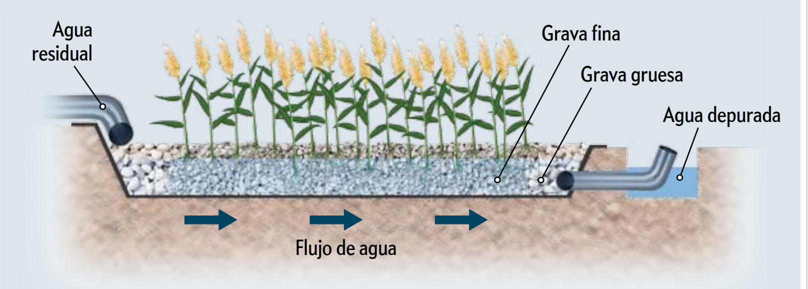


Humedales de flujo superficial

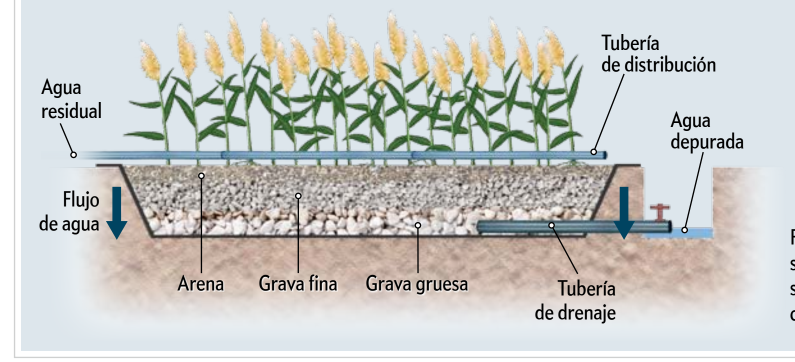
Estos humedales se caracterizan por tener el agua expuesta a la atmósfera. El líquido circula a través de los tallos y las hojas de las plantas, cuya biopelícula se encarga de la eliminación de contaminantes. Suelen emplearse para el tratamiento terciario. La existencia de una lámina de agua favorece su uso en proyectos de restauración ambiental.

Humedales de flujo subsuperficial

En estos sistemas el agua circula bajo tierra y en contacto con las raíces y los rizomas de las plantas, donde crece la biopelícula responsable de la depuración. El medio granular favorece la eliminación de contaminantes, por lo que se prestan también al tratamiento secundario. Sin embargo, la ausencia de agua expuesta los hace menos aptos para proyectos de restauración ambiental. A su vez, pueden ser de dos tipos: de flujo vertical (*abajo*) u horizontal (*derecha*).



FLUJO HORIZONTAL: El agua circula paralela al suelo. Estos humedales se caracterizan por funcionar permanentemente inundados.



FLUJO VERTICAL: El agua fluye de arriba abajo y lo hace a pulsos, lo que requiere el uso de sifones de alimentación. Al no estar siempre inundados, estos humedales presentan características aeróbicas y, con ello, una mayor capacidad de tratamiento.

emplearse también un tratamiento terciario, destinado sobre todo a reducir la carga de microorganismos patógenos. Ello permite reutilizar el agua para determinados fines urbanos, agrícolas e industriales.

Los humedales construidos pueden emplearse como método de tratamiento secundario o terciario. Resultan aptos para depurar aguas de diferente origen, desde domésticas hasta industriales, de minería o de escorrentía superficial. Por regla general, constan de lagunas o canales poco profundos (de menos de un metro) en los que se hace crecer vegetación propia de zonas húmedas. Entre otras plantas, suelen emplearse el carrizo (*Phragmites australis*), la espadaña (*Typha latifolia*) y el lirio amarillo (*Iris pseudacorus*).

La descontaminación en los humedales construidos tiene lugar mediante la interacción entre el agua, el medio granular (grava o arena), los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los procesos fisicoquímicos y microbiológicos implicados degradan la materia orgánica y los nutrientes, pudiendo llegar a eliminar también los microorganismos patógenos. Además de los procesos microbiológicos, en la supresión de contaminantes intervienen la transformación química, la volatilización, la sedimentación, la sorción (adsorción o absorción) y la fotodegradación. Qué procesos prevalecen en cada caso depende, en gran medida, del diseño del humedal.

En líneas generales, los humedales construidos pueden clasificarse en dos grandes categorías: los de flujo superficial, o libre, en los que la mayor parte del tratamiento tiene lugar en una masa de agua; y los de flujo subsuperficial, en los que la depuración acontece principalmente en el terreno. En los primeros, el agua queda expuesta a la atmósfera y circula a través de los tallos y las hojas de las plantas, las cuales se encuentran enraizadas en el fondo. Se trata de lagunas someras, con una profundidad de entre 0,3 y 0,5 metros, en las que la eliminación de contaminantes depende de manera clave de la biopelícula (el conjunto de microorganismos que crecen adheridos a los tallos y las hojas sumergidas). Este tipo de humedales suelen emplearse para el tratamiento terciario; es decir, para mejorar la calidad del agua que ya ha sido procesada en una planta depuradora tradicional.

En los sistemas de flujo subsuperficial, el agua circula bajo tierra, a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La lámina de agua suele encontrarse a una profundidad de entre 0,3 y 0,9 metros y, en este caso, la biopelícula responsable de la eliminación de contaminantes crece adherida al medio granular, las raíces y los rizomas. Comparados con los de flujo libre, los humedales de flujo subsuperficial admiten una mayor carga de contaminantes, por lo que son aptos para el tratamiento secundario. Presentan también un menor riesgo de contacto entre el agua y las personas, así como de aparición de insectos no deseados, como los mosquitos. Sin embargo, la falta de una lámina de agua accesible hace que resulten menos útiles en proyectos de restauración ambiental.

Los humedales subsuperficiales pueden ser, a su vez, de flujo horizontal o vertical. Los primeros se caracterizan por una circulación del agua paralela al suelo y por funcionar permanentemente inundados. En los segundos, el agua corre de arriba abajo y lo hace a pulsos, de modo que el medio granular por lo general no se encuentra anegado. Ello requiere el uso de sifones de alimentación y de una red de tuberías que distribuyan el agua de forma homogénea sobre la superficie del humedal. Dado que no se hallan saturados de forma permanente, los humedales de flujo vertical son mucho más aeróbicos que los horizontales, lo que aumenta su capacidad de tratamiento; es decir, necesitan una superficie menor para degradar una determinada carga de contaminantes. Esto se debe a la mayor transferencia de oxígeno a la biopelícula vegetal, lo que favorece la eliminación de sustancias.

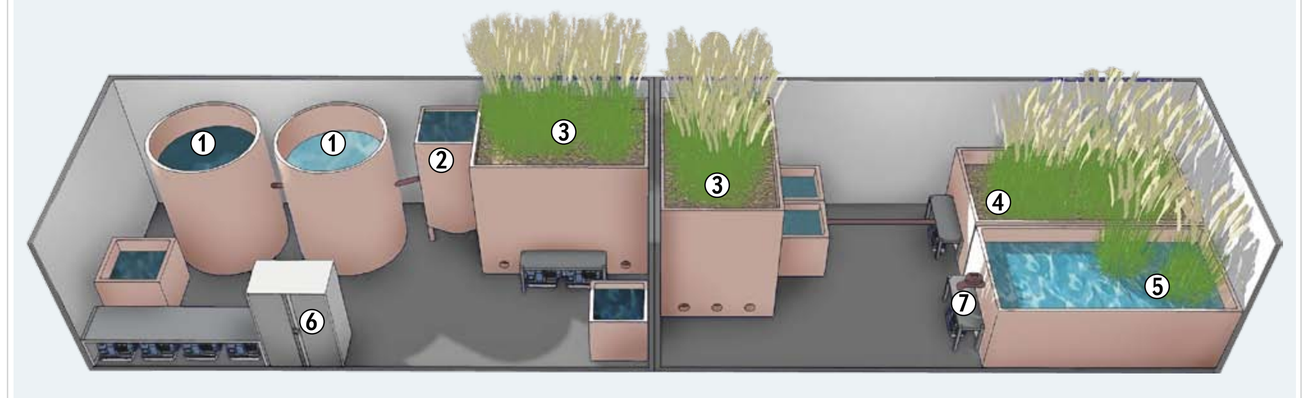


HUMEDAL de flujo subsuperficial vertical situado en el municipio de Challex, en Francia. Presta servicio a unos 2000 habitantes.

PASCAL MOLLE

Humedales híbridos

La combinación de distintos tipos de humedales permite sumar las ventajas de cada método. Países como Austria, Irlanda o Eslovenia ya han implantado sistemas híbridos de humedales verticales seguidos de horizontales. Una de las combinaciones que ha demostrado ser más robusta para el tratamiento del agua en poblaciones pequeñas es la desarrollada por el Grupo de Ingeniería Ambiental y Microbiología de la Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla. A continuación se ilustran los elementos principales de una planta piloto que ha sido estudiada por los autores.



① Agua residual

② Tratamiento primario

③ Humedal subsuperficial vertical
- Degradación de materia orgánica
- Sorción
- Nitrificación

④ Humedal subsuperficial horizontal
- Degradación de materia orgánica
- Sorción
- Desnitrificación

⑤ Humedal de flujo libre
- Eliminación de microorganismos patógenos
- Fotooxidación

⑥ Armario de control

⑦ Agua depurada

CORTESÍA DE LOS AUTORES, MODIFICADO POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

IMPLANTACIÓN Y DESARROLLO

Los primeros experimentos de tratamiento de aguas con humedales construidos se llevaron a cabo en el Instituto Max Planck, en Alemania, en los años cincuenta del siglo pasado. Durante la década siguiente la técnica se expandió por Centroeuropa y, a partir de los años ochenta, los diseños alemanes se introdujeron en Dinamarca, donde en 1987 ya se habían construido cerca de 80 humedales de flujo subsuperficial horizontal para tratar las aguas de pequeños municipios.

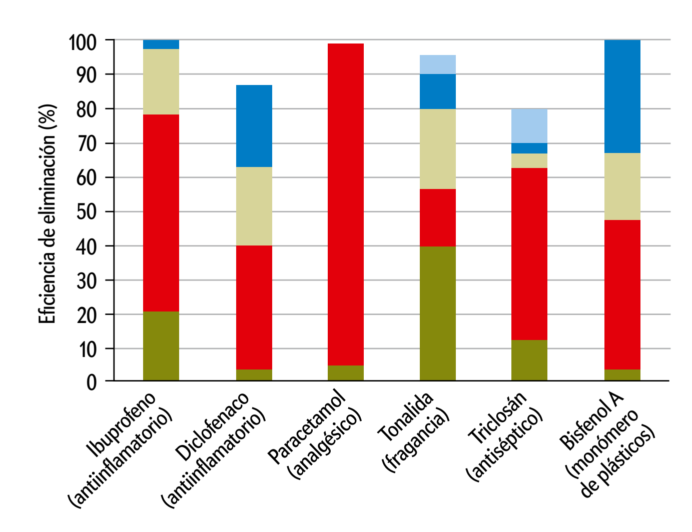
Aunque a finales de los ochenta numerosos países europeos habían incluido la técnica en sus programas de depuración de aguas residuales, no fue hasta la década siguiente cuando los humedales construidos se convirtieron en un método preferente para tratar el agua en pequeñas comunidades y para otras aplicaciones descentralizadas. Hoy existen miles de ellos en todo el mundo, lo que incluye países como el Reino Unido (donde ya se cuentan más de mil humedales), Austria, Bélgica, Polonia, Suecia, la República Checa, Francia o Estados Unidos. Durante los últimos 15 años, también los países europeos del arco mediterráneo (España, Italia, Grecia, Eslovenia y Turquía) han instalado un gran número de humedales construidos.

En un principio se usaron sobre todo humedales de flujo subsuperficial horizontal. Se pensaba que las plantas transferirían el oxígeno necesario a las partes subterráneas para que la biopelícula de las raíces y los rizomas degradase los contaminantes por vía aeróbica. Sin embargo, la experiencia demostró que la vegetación desempeñaba un papel muy limitado en el proceso y que, por su condición de sistemas saturados, el paso del oxígeno del aire al agua resultaba muy insuficiente.

Dichas limitaciones motivaron el desarrollo de humedales de flujo vertical. Su diseño y modo de operación (alimentación intermitente y medio granular no saturado) les confiere características completamente aeróbicas, lo que permite tratar mayores cargas de contaminantes en un espacio menor. En Francia se emplea una variante en la que el agua residual cruda se dirige directamente hacia módulos de humedales divididos en celdas, las cuales son alimentadas de manera intermitente. De esta manera se forma en la superficie un depósito de lodo que se mineraliza durante los períodos de reposo. Las plantas ejercen un papel clave en estos humedales, ya que su crecimiento y el movimiento de los tallos causado por el viento rompe la capa de lodo, lo que permite que se airee y se mineralice por vía aeróbica.

Uno de los desarrollos más recientes consiste en combinar distintos tipos de humedales para aglutinar las ventajas de cada método. Aunque existen varias posibilidades, la más usada hasta ahora consiste en disponer humedales verticales seguidos de horizontales, una técnica que ha sido empleada en países como Austria, Irlanda o Eslovenia. Los sistemas híbridos están recibiendo gran atención en Europa debido a la Directiva Marco del Agua de la UE, la cual establece requisitos muy estrictos sobre la calidad del agua.

Un sistema híbrido que ha demostrado ser muy robusto para el tratamiento del agua en poblaciones pequeñas es la combinación en serie de un humedal de flujo subsuperficial vertical, seguido de uno horizontal y de otro de flujo libre. Esta configuración ha sido diseñada, construida y explotada por el Grupo de Ingeniería Ambiental y Microbiología de la Univer-



ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES: Los humedales construidos han demostrado una elevada eficiencia en la eliminación de algunas sustancias que se resisten a las técnicas habituales de tratamiento. Entre ellas destacan los contaminantes emergentes: sustancias como fármacos, plaguicidas y hormonas que, aunque se han encontrado en concentraciones bajas en el medio acuático, son objeto de investigación por sus posibles efectos a largo plazo. Esta gráfica muestra las eficiencias de eliminación de varios contaminantes en la planta híbrida de humedales del Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla.

DE: «EMERGING ORGANIC CONTAMINANT REMOVAL IN A FULL-SCALE HYBRID CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM FOR WASTEWATER TREATMENT AND REUSE», CRISTINA ÁVILA ET AL. EN *ECOLOGICAL ENGINEERING*, VOL. 80, PÁGS. 108-116, JULIO DE 2015

sidad Politécnica de Cataluña, al que pertenecemos dos de los autores (Ávila y García), y el Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla.

El estudio de dicha configuración, tanto a escala experimental como real y durante largos períodos de tiempo, ha demostrado que se trata de un sistema con una eficiencia muy elevada en la eliminación de contaminantes, incluso con elevadas cargas orgánicas e hidráulicas. En una primera fase, el humedal vertical asume la mayor carga de sólidos y materia orgánica y nitrifica el amonio. Después, en el humedal horizontal tienen lugar varios procesos anaeróbicos y de desnitrificación; es decir, la conversión de nitratos y nitritos en nitrógeno molecular, que se libera a la atmósfera. Por último, el humedal de flujo libre funciona como tratamiento terciario, destinado a afinar la calidad del agua. Los mecanismos principales en esta etapa son los de fotodegradación, los cuales reducen la carga microbiológica patógena y permiten la fotooxidación de algunos compuestos persistentes. Gracias a ello, el agua resultante puede reutilizarse con fines urbanos, agrícolas, industriales, recreativos y ambientales; entre ellos, el riego de cultivos, parques y zonas verdes, el baldeo de calles, la recarga de acuíferos o la restauración de áreas degradadas.

DESCONTAMINACIÓN EFICIENTE

En los últimos años, varios estudios han observado que los humedales construidos presentan, además, una elevada capacidad para eliminar algunos contaminantes que suelen sobrevivir a las técnicas tradicionales de tratamiento de aguas. Conocidos como «contaminantes emergentes», estos compuestos incluyen una amplia variedad de sustancias, como fármacos, productos de cuidado personal, plaguicidas, hormonas, aditivos industriales y sus productos de transformación. La ubicuidad de estos contaminantes ha generado una gran preocupación tanto en la sociedad como entre la comunidad científica debido a sus posibles efectos sobre los ecosistemas y la salud pública. De hecho, numerosos estudios realizados en todo el mundo han hallado trazas de estos compuestos en acuíferos y en el agua potable.

Varios trabajos han mostrado ya algunos efectos alarmantes. Por ejemplo, la disminución del 90 por ciento que desde los años noventa ha experimentado la población de buitres en la India, Pakistán y Nepal se ha relacionado con el uso de diclofenaco, un fármaco antiinflamatorio administrado al ganado de esos países y que, presumiblemente, causa fallo renal en dichas aves [*véase* «Humanos y carroñeros: una larga historia de encuentros y desencuentros», por J. A. Sánchez Zapata, M. Monleón y Z. Morales Reyes; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015]. El bisfenol A, un monómero empleado en la fabricación de plásticos duros y resinas epoxi, ha sido prohibido hace poco en países como Canadá, Francia, y EE.UU., especialmente en productos destinados a mujeres embarazadas y niños, debido a sus conocidos efectos de alteración endocrina durante las fases reproductiva y de crecimiento [*véase* «Riesgos del bisfenol A», por Heather Patisaul; Investigación y Ciencia, abril de 2010].

Las concentraciones de contaminantes emergentes en el medio acuático son a menudo bajas, de algunas partes por billón o por mil millones (nanogramos o microgramos por litro), por lo que pueden parecer inocuas para la salud humana. Sin embargo, por el momento no hay estudios que hayan evaluado los efectos de una exposición crónica a dichas concentraciones, y los que han analizado una exposición aguda han observado consecuencias adversas sobre los ecosistemas acuáticos; entre ellas, una disminución de la biodiversidad en ríos, así como la feminización o cambio de ratio de sexo en peces y moluscos, asociada a efluentes contaminados con hormonas y otras sustancias endocrinas.

Debido a que el concepto tradicional de saneamiento no contempla esos contaminantes, las estaciones depuradoras al uso no han sido diseñadas para eliminarlos. Como consecuencia, son vertidos de forma continuada en aguas desde las que pueden ejercer efectos aún desconocidos sobre los ecosistemas. Por esta razón, hoy en día se están investigando múltiples métodos de tratamiento terciario del agua; en su mayoría, procesos avanzados de oxidación, como la ozonización o la irradiación con luz ultravioleta. Sin embargo, aunque han demostrado mejorar la eliminación de dichos contaminantes, estas técnicas adolecen a menudo de un coste demasiado elevado y de una alta demanda energética. Además, los productos de transformación generados pueden resultar, en algunos casos, igual o incluso más persistentes o tóxicos que el compuesto del que proceden.

Aunque la investigación en este campo se encuentra aún en un estado embrionario, los contaminantes emergentes son hoy objeto de un gran interés científico, sobre todo en lo referente a su ecotoxicología, sus mecanismos de degradación y los métodos para eliminarlos. En este contexto, numerosos estudios han demostrado que, en comparación con los sistemas de tratamiento habituales e incluso otros más avanzados, los humedales construidos ofrecen una alta eficiencia en su eliminación. Estos sistemas son capaces de suprimir en alto grado varias

sustancias que se resisten a las técnicas tradicionales, como el diclofenaco, al tiempo que reducen la estrogenicidad y otros efectos tóxicos del agua contaminada. Esta eficiencia se debe, por un lado, a la gran complejidad fisicoquímica y microbiológica de los humedales, caracterizados por una gran diversidad bacteriana y por numerosas reacciones de degradación, y, por otro, al elevado tiempo que el agua permanece en contacto con el sistema de filtrado.

EL RETO DEL SANEAMIENTO EN EL MUNDO

Aunque casi todos los países desarrollados han logrado el acceso universal al saneamiento, la cobertura de este servicio varía ampliamente en los países en vías de desarrollo. De los 2500 millones de personas que hoy en día no disponen de él, la gran mayoría vive en tres regiones: el África subsahariana, el sur y el este de Asia. Sin embargo, de todas las actividades destinadas al desarrollo de dichas zonas, el tratamiento de aguas residuales suele ser considerada una de las menos prioritarias.

Mientras que en los países industrializados la mayor preocupación consiste en controlar la descarga de microcontaminantes (metales pesados, fármacos, productos de cuidado personal, etcétera), en los países en desarrollo se persigue reducir el número de patógenos a niveles que frenen de manera sustancial la transmisión de enfermedades. Ese objetivo debe conseguirse con sistemas de depuración sostenibles, económicos y fáciles de operar. Los humedales artificiales se adaptan particularmente bien a estas necesidades, ya que la mayoría de los materiales necesarios para su construcción se encuentran disponibles in situ y la comunidad local puede ser entrenada para su operación y mantenimiento. Estos sistemas permiten, además, obtener algunos beneficios adicionales, como la producción de biomasa, la conservación de la biodiversidad y la reutilización del agua para acuicultura, agricultura o fines recreativos.

A pesar de su enorme potencial, la implantación de humedales en los países en desarrollo ha sido mucho más lenta que en las naciones industrializadas, debido, en gran parte, a una falta de conocimiento y experiencia por parte de la población local. Además, los programas de ayuda tienden a favorecer tecnologías que ofrezcan una salida comercial para los financiadores. Por último, aunque los asesores de los países desarrollados suelen conocer bien las técnicas más apropiadas para sus respectivas naciones, a menudo fallan a la hora de trasladarlas a las realidades y culturas de los países pobres, por lo que acaban proponiendo diseños «del norte» en ambientes tropicales.

No obstante, durante la última década los humedales construidos han ganado popularidad en numerosas naciones de renta media y baja. Hoy podemos encontrar múltiples ejemplos en varios países de África (Marruecos, Egipto, Tanzania, Kenia, Uganda), Asia (India, Tailandia, China, Taiwán, Nepal, Pakistán, Filipinas, Vietnam), Latinoamérica (Colombia, México, Brasil, Chile, Nicaragua, El Salvador, Costa Rica, Uruguay, Perú, Argentina) y el este de Europa (Hungría, Eslovaquia, Bulgaria, Bosnia y Serbia, entre otros). Dichas instalaciones abarcan todo tipo de tamaños, desde aquellas de uso unifamiliar hasta otras que abastecen a miles de personas, así como una gran diversidad de usos. Entre ellos cabe destacar el tratamiento de aguas urbanas y de escorrentía, el drenaje de minas, los lixiviados de vertederos y la depuración de efluentes de hospital, residuos agrícolas y aguas procedentes de varias industrias (textil, de curtiduría, lechera, azucarera, chocolatera, etcétera).

En general, los humedales artificiales instalados en países en desarrollo han demostrado una buena eficiencia en la depuración del agua y en la eliminación de contaminantes. Ese buen rendimiento se debe a que la mayoría de ellos se encuentra en zonas tropicales y subtropicales, donde estos sistemas funcionan particularmente bien debido a la mayor actividad biológica que induce un clima cálido. Por otro lado, los ejemplos fallidos pueden atribuirse a menudo a una falta de conocimiento de la técnica por parte de la población local.

La experiencia demuestra que, para el buen funcionamiento de estos sistemas, resulta imprescindible contar con la participación de la comunidad y de las autoridades locales en todas las fases del proyecto, desde su diseño hasta su gestión. La operación y mantenimiento de un humedal construido no necesita servicios técnicos altamente cualificados, sino que basta con que un miembro de la comunidad reciba la instrucción adecuada y, llegado el caso, la asistencia puntual de expertos. El éxito de la técnica depende también de la posibilidad de contar con materiales y vegetación locales, lo que requiere tener en cuenta las características del lugar y las necesidades concretas de cada proyecto. Si bien la necesidad de un mayor número de infraestructuras de saneamiento está clara, no existe una solución de saneamiento única.

La aceptación de esta técnica en los países en desarrollo depende también de la posibilidad de obtener algún ingreso derivado. En este sentido, el cultivo de flores ornamentales o vegetación de forraje, la combinación con sistemas de lagunaje que permitan la acuicultura o la creación de áreas recreativas puede servir para lograr un beneficio económico, al mismo tiempo que se reutiliza el agua residual y se cierra así el ciclo de nutrientes.

En cualquier caso, la educación y la difusión de la información resultarán clave para fomentar la construcción de humedales artificiales y otros sistemas naturales en las regiones más necesitadas. En los últimos años se han producido avances alentadores en este sentido, como la creciente financiación de la Comisión Europea a proyectos relacionados con la implantación de técnicas de bajo coste para los países en desarrollo. Entre ellos cabe destacar el reciente proyecto WaterBiotech para la instalación de humedales construidos en varios países de África y, en la actualidad, otros cinco proyectos de cooperación con India para el tratamiento del agua residual urbana.

PARA SABER MÁS

Treatment Wetlands (2.ª edición). R. H. Kadlec y S. D. Wallace. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.

Integrated treatment of combined sewer wastewater and stormwater in a hybrid constructed wetland system in southern Spain and its further reuse. C. Ávila et al., en *Ecological Engineering*, vol. 50, págs. 13-20, 2013.

Attenuation of emerging contaminants in a hybrid constructed wetland system under different hydraulic loading rates and their associated toxicological effects in wastewater. C. Ávila et al. en *Science of the Total Environment*, págs. 470-471 y 1272-1280, 2014.

Progress on sanitation and drinking water: Update and MDG assessment. Informe de Unicef y la Organización Mundial de la Salud, 2015. Disponible en **www.unicef.org/publications/index_82419.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

Reutilización de aguas residuales. Olive Heffernan en *IyC*, septiembre de 2014.

Aprovechamiento de aguas residuales en España. Joan García en *IyC*, septiembre de 2014.

Gestión desinformada. Blanca Jiménez Cisneros en *IyC*, marzo de 2014.

Un rompecabezas global. Michael E. Webber en *IyC*, febrero de 2015.

Dietrich Lemke es director emérito del Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg.



HISTORIA DE LA CIENCIA

DE LA QUÍMICA A LA ASTROFÍSICA MODERNA

La interpretación que Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen dieron a las líneas de Fraunhofer permitió conectar la física, la química y la astronomía

Dietrich Lemke

SERIE

LOS ORÍGENES DE LA ESPECTROSCOPÍA

1. **Fraunhofer: artesano, empresario y científico**
   Dietrich Lemke
   Enero de 2016

2. **Kirchhoff, Bunsen y la exploración astrofísica del universo**
   Dietrich Lemke
   Febrero de 2016

A principios del siglo xix, los físicos ya habían acumulado varios indicios sobre la naturaleza ondulatoria de la luz. Tomándola como premisa, Augustin Fresnel elaboró en 1818 una explicación convincente de los fenómenos de difracción. Habían preparado el camino la idea de Christian Huygens de las ondas elementales que parten de cada punto de un frente de ondas y, en 1802, los experimentos de la doble rendija de Thomas Young.

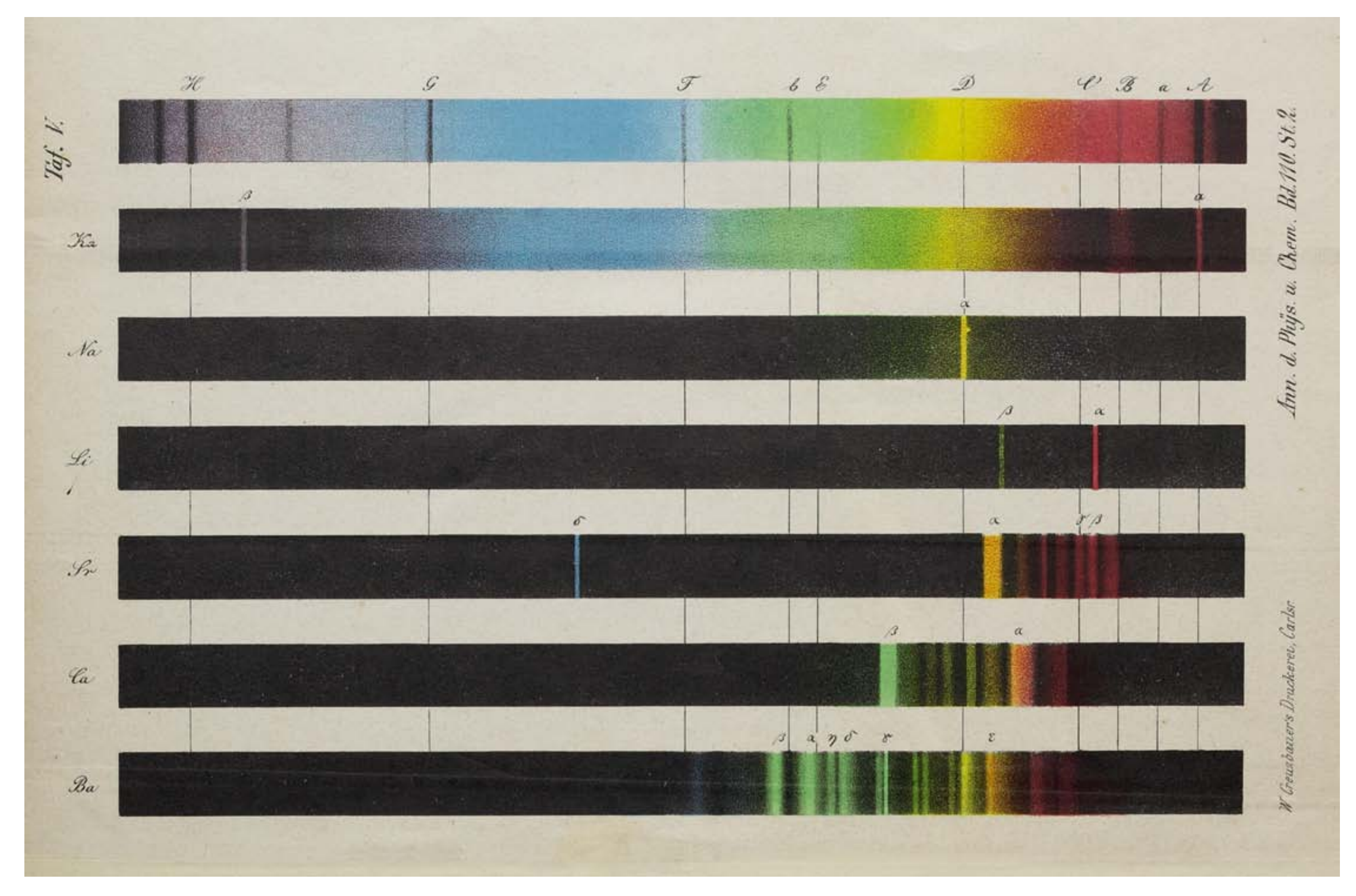
Joseph Fraunhofer comenzó a investigar la naturaleza de la luz hacia la misma época. En 1821 presentó sus resultados ante la Real Academia de Múnich en una memoria en la que, sin introducción teórica, daba cuenta del resultado de varios experimentos con múltiples variaciones del montaje y de los elementos difractivos.

EN SÍNTESIS

En 1823, gracias al estudio de los fenómenos de difracción e interferencia, Joseph Fraunhofer logró determinar las longitudes de onda de las líneas oscuras que poco antes había descubierto en el espectro solar.

La naturaleza de dichas líneas siguió siendo desconocida durante decenios. Hacia 1860, el químico Robert Bunsen y el físico Gustav Kirchhoff identificaron en ellas las líneas espectrales de los elementos químicos.

La espectroscopía acabaría convirtiéndose en una de las principales técnicas de observación en astrofísica. Su estudio impulsó otros avances fundamentales, como el descubrimiento de las leyes de radiación y el análisis del cuerpo negro.



LUZ ELEMENTAL: Hacia 1860, Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen inauguraron la era del análisis químico por medio de la observación espectral. Esta imagen reproduce los espectros de laboratorio de algunos elementos alcalinos y alcalinotérreos. La banda superior muestra las líneas oscuras descubiertas por Fraunhofer en el espectro solar.

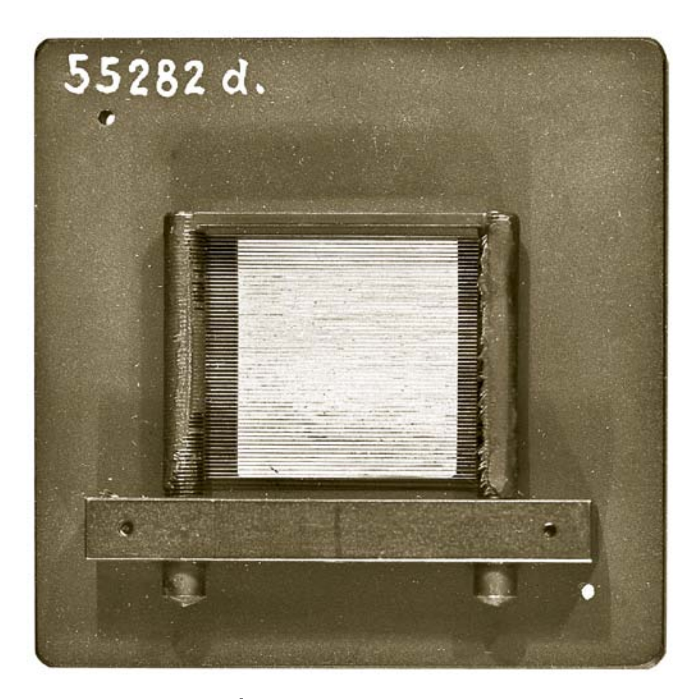
Sus mediciones le permitieron deducir las leyes de la difracción de una forma completamente distinta a la de Fresnel, para quien la teoría ocupaba el primer plano.

Las investigaciones del óptico bávaro mostraban un mayor sentido práctico. Bajo el epígrafe «Influencia mutua de un gran número de rayos difractados» escribió: «Para que sobre la superficie del objetivo del telescopio del teodolito incidiese una gran cantidad de rayos difractados en idéntica medida, tendí en paralelo sobre un bastidor muchos hilos del mismo grosor separados por igual; de esta manera, la luz tenía que difractarse por los espacios entre ellos. Para estar seguro de que los hilos eran exactamente paralelos y que la distancia que los separaba era siempre la misma, introduje, entre los lados opuestos del marco cuadrado, un tornillo de paso muy fino, de unos 169 filetes por pulgada parisina, e hice pasar los hilos entre los filetes del tornillo». Después fabricó un tornillo de 340 vueltas por pulgada (125 rendijas por centímetro): «Cuanto más estrecho es el paso del tornillo entre cuyos filetes se tienden los hilos, tanto mayores se vuelven los espectros; [...] da del todo igual que los hilos sean más finos o más gruesos». De esta manera, cayó en la cuenta de que la magnitud relevante era la hoy llamada constante de red (en este caso, el grosor de los hilos más la anchura de la rendija).

De la rejilla de alambres pasó a trabajar con vidrios planos, los cuales rayaba con puntas de diamante con una máquina de graduar ideada por él mismo y que le permitió conseguir hasta 3000 líneas por centímetro. Grabó líneas paralelas en vidrios recubiertos con oro; investigó los espectros de reflexión y, tras retirar el recubrimiento, también los de transmisión. Comprobó que eran parecidos.

Fraunhofer podía preparar en su propio taller todos los elementos ópticos y mecánicos que necesitaba. Esa simbiosis entre manufactura y laboratorio fue precisamente una de las razones de su éxito. En vez de trabajar a simple vista, como sus predecesores, utilizó telescopios de teodolito, lo que le permitió captar una mayor intensidad luminosa y medir con precisión los efectos de difracción. Sus exhaustivos experimentos revelaron nuevos y fundamentales aspectos sobre las propiedades de las redes de difracción; entre ellos, la obtención de espectros de diferente orden con longitudes crecientes, la atenuación del brillo y el aumento del solapamiento mutuo, y la influencia de la constante de red en el ángulo de difracción y de la forma de la ranura en el brillo de los espectros parciales, origen de las redes que hoy llamamos «rejillas de escala» (*échelette* o *blazed gratings*).

Para su regocijo, Fraunhofer halló en sus espectros de red las líneas oscuras que ya había descubierto en el espectro solar. No obstante, unos y otros exhibían ligeras diferencias; en especial, la parte roja-amarilla se mostraba ahora más ancha, debido a que los prismas tienden a desviar en mayor medida la



REDES DE DIFRACCIÓN: Fraunhofer comenzó a investigar los fenómenos de difracción con rejillas de alambre construidas por él mismo. Para asegurarse de que la separación entre los hilos era constante, los tendió entre tornillos de paso muy fino.

luz azul, mientras que las rejillas hacen lo propio con la roja. La separación entre líneas también presentaba una proporción distinta. Al respecto, Fraunhofer escribió: «Es notable que las leyes de influencia mutua y de difracción de los rayos puedan deducirse de los principios del movimiento ondulatorio; y que, solo a partir del ángulo de la desviación de la luz debida a su mutua influencia y de la distancia en que los rayos se influyen uno a otro, pueda derivarse la magnitud de una oscilación para cada color por medio de la más simple de las ecuaciones».

En una investigación ulterior, publicada en 1823 y titulada «Breve informe sobre los resultados de nuevos experimentos concernientes a las leyes de la luz y la teoría de estas», Fraunhofer logró asignar longitudes de onda a las líneas oscuras observadas en el espectro del Sol. Para la línea amarilla *D* dedujo, por ejemplo, una longitud de 0,00002175 pulgadas parisinas, o 588,8 nanómetros, un valor que difiere del actual en solo un 0,1 por ciento. Para las demás líneas obtuvo resultados de una precisión similar.

No deja de maravillar que, hace doscientos años y con aparatos construidos por él mismo, Fraunhofer determinase longitudes de onda con una precisión de una parte entre mil. Si los astrónomos y agrimensores de la época se dirigían a los fabricantes de instrumentos como «artistas», semejante reconocimiento era especialmente merecido para Fraunhofer. Sus mediciones de la longitud de onda de las líneas oscuras observadas en el espectro solar fueron consideradas durante decenios como patrón de referencia.

Los experimentos de Fraunhofer dieron el espaldarazo definitivo a la teoría ondulatoria de la luz, cuyo fundamento teórico habían establecido poco antes Young y Fresnel. Hasta ese momento, la teoría corpuscular de Newton había gozado de numerosos partidarios. Sin embargo, los fenómenos de difracción e interferencia hacían cada vez más difícil defender que la luz estuviese formada por partículas. Por aquella época también se ocupó del asunto Goethe, investigador de la naturaleza además de escritor. Su libro *Teoría de los colores*, publicado en 1810, se apartó de la concepción fisicomatemática de Newton, aunque sobre todo por razones fisiológicas.

MUERTE PREMATURA

Gracias a los precisos y exhaustivos experimentos de Fraunhofer, tanto los fenómenos de difracción e interferencia como el uso de redes ópticas para la espectroscopia de alta resolución adquirieron una gran relevancia en diversos dominios de la ciencia. Sus trabajos recibieron el reconocimiento de los eruditos de toda Europa. Carl Friedrich Gauss viajó desde Gotinga para visitarle y encargarle instrumentos. Lo mismo hicieron el físico británico David Brewster (inventor del caleidoscopio y el estereoscopio) y Thomas Young. Desde Copenhague llegó Hans Christian Ørsted para ver con sus propios ojos los experimentos de difracción. El astrónomo inglés John Herschel acudió a Benediktbeuern para instruirse en la fabricación de vidrios sin defectos, de los que se carecía en Inglaterra. Y aunque de aquellos secretos no logró aprender nada, pudo ver las líneas oscuras del espectro solar generado con el valioso prisma de vidrio *flint*. A propuesta de Herschel, la Real Sociedad Astronómica inglesa hizo miembro a Fraunhofer. En 1822, el óptico recibiría también un doctorado honorífico de la Universidad de Erlangen, en Baviera.

Cada vez más atraído por su vocación científica, Fraunhofer logró distanciarse un tanto de la actividad empresarial que mantenía junto con su socio Utzschneider. A fin de poder dedicar más tiempo a la investigación, en verano de 1823 solicitó al rey de Baviera un puesto retribuido en la Real Academia de Múnich. La petición fue aprobada enseguida y, al poco, sus disertaciones le convirtieron en «una brillante luz en la Academia», como acabaron reconociendo incluso sus antiguos detractores. En 1824 recibió la Orden del Mérito de la Corona bávara, lo que supuso su ennoblecimiento y la adición de la preposición *von* a su apellido.

Con todo, Fraunhofer siguió dedicando la mayor parte del tiempo al instituto de óptica fundado por Utzschneider, el cual también le proporcionaba cuantiosos ingresos. Por un lado, hubo que construir el gran refractor de Tartu, que en 1824 se entregó a Estonia. Por otro, se preparó el heliómetro de Friedrich Wilhelm Bessel en Königsberg, gracias al cual se consiguió, en 1834, medir por primera vez la distancia a una estrella.

Fraunhofer publicó una «Teoría de las coronas, parhelios y fenómenos afines» en la que daba cuenta de sus conocimientos sobre la difracción; empezó a investigar la polarización de la luz y se convirtió en un consejero económico muy reclamado en lo concerniente a la óptica y los vidrios. Hacia 1825, su carrera científica y empresarial estaba en pleno auge: gozaba de fama mundial y se había convertido en un hombre pudiente. Ya no había necesidad de adquirir los instrumentos ópticos en Londres y París, puesto que los mejores se fabricaban ahora en Múnich. Para garantizar la continuidad del instituto que tanta gloria le había dado ya a la región, el Estado bávaro consideró adquirirlo. El instituto de Múnich y la fábrica de Benediktbeuern recibieron la visita de empresarios, diplomáticos y políticos de toda Europa. El zar Alejandro I de Rusia hizo que se construyesen en Baviera los instrumentos que necesitaba para varios observatorios astronómicos. Además de sus telescopios y teodolitos, adquirieron también fama sus microscopios, muy bien equipados. Gracias a ellos se fomentó la investigación en nuevos campos de las ciencias naturales.

Al mismo tiempo que conseguía todos esos éxitos, Fraunhofer, que siempre había aparentado ser físicamente débil, enfermó. Una dolencia pulmonar, cabe suponer que tuberculosis, deterioró su salud a ojos vista. Su incansable trabajo en la cálida y polvorienta fábrica de vidrio, llena de vapores de plomo, debió minar aún más sus defensas. Su estado empeoró considerablemente en otoño de 1825, cuando, acalorado tras una fundición de vidrio en Benediktbeuern y un paseo por las montañas, regresó a Múnich en balsa por el río Isar en un día lluvioso. Desde entonces ya no volvería a levantarse de la cama. Fue atendido por los mejores médicos, pero en aquella época nada podía hacerse contra la tuberculosis. Desde su lecho, Fraunhofer dictó el procedimiento confidencial de fabricación de su vidrio *crown*, que durante largo tiempo se guardaría como secreto de Estado.

Se planeó una estancia curativa en el Mediterráneo, pero esta jamás tuvo lugar. Fraunhofer murió el 7 de julio de 1827 a los 39 años de edad. Utzschneider dispuso que fuera enterrado en el cementerio sur de Múnich junto a Reichenbach, su antiguo socio, cuya muerte, ocurrida solo dos semanas antes, se había ocultado al enfermo. Utzschneider mandó cincelar en su tumba las palabras *Approximavit sidera*: «Nos ha acercado las estrellas». El destino le golpeó una vez más 117 años después: durante la Segunda Guerra Mundial, un ataque aéreo británico destruyó el sepulcro. Desde su reconstrucción simplificada, este puede visitarse de nuevo.

DE LA ÓPTICA A LA QUÍMICA

La fama del óptico bávaro hizo que, tras su muerte, los talleres de Múnich siguieran suministrando telescopios, microscopios y teodolitos a toda Europa. Las líneas de Fraunhofer se emplearon para identificar materiales ópticos y para calibrar longitudes de onda, pero la manera en que se originaban en el Sol y las estrellas seguía siendo un misterio. Los astrónomos de la época no se interesaron por la espectroscopía; en su lugar, continuaron dedicándose a la astrometría y al estudio de los asteroides.

Aquello cambió por completo cuando, 45 años después de la muerte de Fraunhofer, el químico Robert Bunsen y el físico Gustav Kirchhoff aclararon la naturaleza física de las líneas, sin intuir que con ello estaban inaugurando una nueva era en física y astronomía. Ambos se conocieron hacia 1850 en la Universidad de Breslau. En 1852, Bunsen consiguió una plaza en la Universidad de Heidelberg y, dos años después, logró el nombramiento de Kirchhoff para la cátedra de física, con lo que empezó una fructífera colaboración interdisciplinar entre ellos. Por aquel entonces Bunsen estaba investigando la posibilidad de efectuar análisis químicos a partir de la coloración de las llamas, pues había advertido que las distintas sales metálicas otorgaban al fuego tonalidades diferentes. A tal fin creó el tipo de mechero que hoy lleva su nombre, en cuya llama se introducía la sustancia bajo estudio. Por su parte, Kirchhoff se dedicó a los experimentos de óptica. Pretendía aclarar los polémicos resultados relativos al eje óptico del cristal birrefringente de aragonita. Su aparato de medida se apoyaba en los experimentos de Fraunhofer, con un telescopio de teodolito y un prisma de vidrio *flint* (tallado por Fraunhofer) para obtener el espectro solar.

Según se cuenta, tras contemplar unos fuegos artificiales sobre el castillo de Heidelberg ambos científicos hablaron acerca de los experimentos que tenían en marcha. Kirchhoff recomendó a su amigo que afinase las investigaciones sobre las llamas mediante un análisis de sus espectros. Enseguida idearon un aparato espectral consistente en un prisma relleno de disulfuro de carbono (una sustancia que ofrece un espectro muy extenso) y dos telescopios. El ocular del colimador se sustituía por una rendija, ante la cual se encontraban el mechero Bunsen y el portador de muestras.

Bunsen, químico analítico de primera fila, era capaz de obtener sustancias muy puras, como sal de litio a partir de catorce precipitaciones en carbonato amónico o sal de potasio mediante una recristalización óctuple. Pronto ambos descubrieron que cada elemento químico generaba sus propias líneas brillantes. De hecho, bastaban unos pocos miligramos de sustancia para identificarla a partir del espectro. En el caso del sodio, unas milmillonésimas de gramo eran suficientes para que la llama cobrase un vivo color amarillo.

Para determinar las longitudes de onda de las líneas de emisión, Bunsen y Kirchhoff emplearon las líneas de Fraunhofer. Dirigieron luz solar muy atenuada a la rendija de su espectró-



MUSEO ALEMÁN, MÚNICH

JOSEPH FRAUNHOFER logró un gran éxito como óptico, empresario y científico. A los 37 años le fue otorgado el tratamiento de noble.

ROBERT BUNSEN (*derecha*) junto con Gustav Kirchhoff hacia 1860 en la Universidad de Heidelberg.



metro, de modo que la línea brillante de la llama de sal común (cloruro de sodio, NaCl) coincidiese con la línea oscura *D* del espectro solar. Sin embargo, al dejar entrar más luz del sol, ocurrió algo inesperado: la línea oscura, en lugar de tornarse más clara al sumársele la línea brillante de la sal común, se volvió aún más oscura. Kirchhoff enseguida se percató de que tras aquella desconcertante observación se escondía algo fundamental. Como físico con formación matemática, buscó una explicación teórica: las sustancias que emitían una determinada radiación podían también absorberla; para otras longitudes de onda, eran transparentes.

Kirchhoff efectuó varias comprobaciones experimentales. En primer lugar, los compuestos de litio expuestos a la llama del mechero Bunsen generaban una línea roja brillante que, sin embargo, carecía de equivalente entre las líneas oscuras del espectro solar. No obstante, cuando la luz del sol atravesaba la llama de litio, «aparecía en su lugar una línea oscura que tenía por completo el mismo carácter que las líneas de Fraunhofer», escribió el físico en una memoria redactada en 1859. Por otro lado, cuando la luz brillante emitida por una pieza de cal calentada al blanco atravesaba una llama de sal común a una temperatura menor, se producían «líneas oscuras de notable nitidez y delicadeza» e idénticas a la línea *D* del espectro solar. «Así pues, las líneas *D* del espectro solar pueden inducirse artificialmente en un espectro en el que no aparecen de forma natural», refería Kirchhoff.

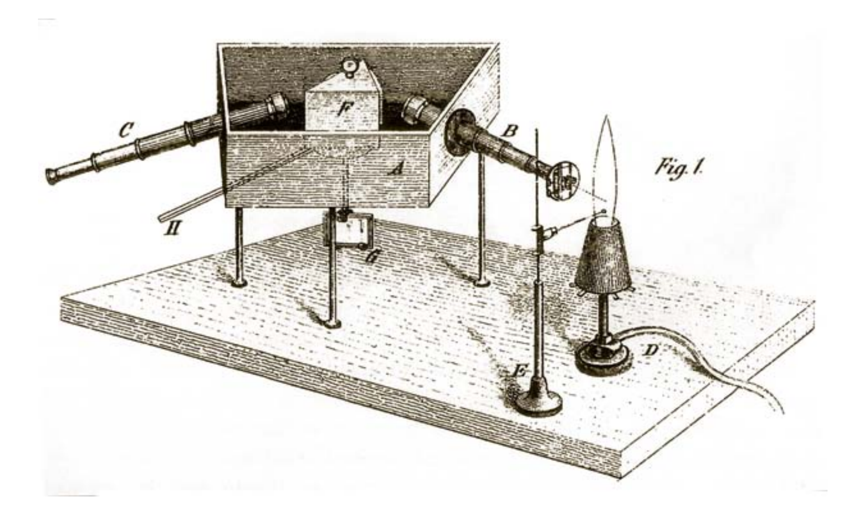
Con una llama más caliente, sin embargo, el mismo experimento no generaba líneas de Fraunhofer artificiales. Por tanto, extrapolando los resultados al Sol, significaba que el sodio debía de encontrarse en una capa de la atmósfera solar más fría. El oscurecimiento adicional que experimentaba la línea *D* al atravesar la llama de sal común en el laboratorio se debía a la absorción que tenía lugar en esta última, más fría (a unos 1000 grados Celsius) que el astro (unos 5500 grados).

Gracias a tales experimentos, Kirchhoff abrió el camino para determinar por primera vez la composición química de un cuerpo celeste. Las numerosas líneas de Fraunhofer debían corresponder a otros elementos: «El análisis químico de la atmósfera solar solo requiere el examen de aquellas sustancias que, introducidas en una llama, hacen aparecer líneas brillantes coincidentes con las líneas oscuras del espectro solar», concluía el físico.

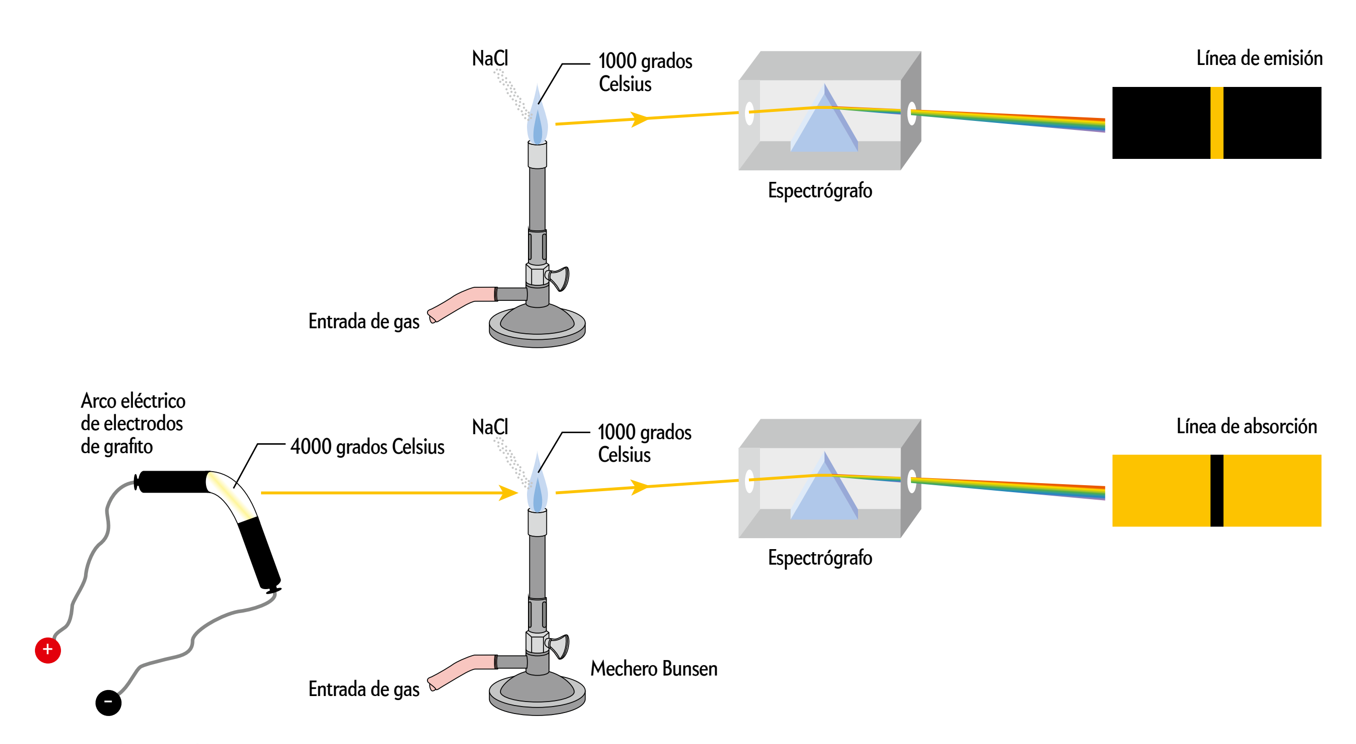
LA COMPOSICIÓN DEL SOL

Kirchhoff y Bunsen se pusieron en contacto con August Steinheil, que regentaba un taller de óptica y astronomía en Múnich, para encargarle un espectrómetro de cuatro prismas que debía alcanzar una resolución especialmente alta. En verano de 1860, colocaron el aparato tras una ventana del Instituto de Física de Heidelberg. Además de la luz solar, dirigieron a la rendija del telescopio colimador la luz de un espectro de descarga, que mostraba al mismo tiempo las líneas de los metales de los electrodos.

Kirchhoff dibujó cuidadosamente un espectro de 250 centímetros de largo que contenía todas las líneas observadas. Al comparar las líneas solares y las de laboratorio, pudo deducir qué elementos químicos se hallaban presentes en el astro: hierro, bario, estroncio, magnesio, sodio, calcio, cobre, zinc, níquel, cromo... Le bastó la coincidencia de 60 líneas del hierro con las correspondientes de Fraunhofer para deducir que la probabilidad de que se tratase de una coincidencia era de 10^{-18}: «La



EL PRIMER APARATO ESPECTRAL de Kirchhoff y Bunsen constaba de un prisma y dos telescopios. El ocular del telescopio de la derecha (*B*) se colocaba en una rendija ante la que se encontraban la llama del mechero Bunsen (*D*) y el portador (*E*) de la sustancia objeto de análisis. El telescopio producía rayos de luz paralelos que atravesaban un prisma hueco (*F*) relleno de disulfuro de carbono. El espectro así generado, muy extenso, era observado con el telescopio de la izquierda (*C*). En la actualidad, el Museo de la Universidad de Heidelberg acoge una reproducción del montaje original de Kirchhoff y Bunsen.



INVERSIÓN DE LÍNEAS: La sal común (NaCl) expuesta a la llama no luminosa de un mechero Bunsen produce un espectro de líneas de emisión (*arriba*). Cuando la luz de una lámpara de arco eléctrico, más caliente que la llama del mechero Bunsen, atraviesa esta última, la absorción por parte del sodio genera líneas oscuras sobre un fondo de luz continua. Al igual que ocurre en el espectro solar, dichas líneas oscuras aparecen en el mismo lugar que las líneas de emisión.

observación del espectro solar parece demostrar la presencia de vapores de hierro en la atmósfera solar con tanta certeza como cabe esperar de las ciencias naturales».

Era evidente que el Sol contenía la misma clase de elementos químicos que existían en la Tierra. Una conclusión que resultaba creíble, pues por aquel entonces ya se sabía que en los meteoritos —hasta ese momento, la única fuente de información sobre la química del universo— había hierro y níquel. Las investigaciones espectroscópicas efectuadas en el laboratorio de Heidelberg propiciaron, además, otros hallazgos de importancia. Gracias a la observación de ciertas líneas nunca antes vistas en el rojo y el azul, Bunsen y Kirchhoff descubrieron dos nuevos elementos: el cesio (en el agua mineral de la ciudad de Dürkheim) y el rubidio.

Pero el estudio de las líneas de Fraunhofer condujo a Kirchhoff a otros resultados de enorme importancia. Formuló su ley de la radiación, según la cual: «Para cada tipo de radiación, la relación entre la capacidad de emisión y la de absorción es idéntica para todos los cuerpos que se encuentran a la misma temperatura; [...] los cuerpos emiten radiación dependiendo únicamente de la temperatura hasta la que se calientan, y la radiación que absorben se transforma por completo en calor». Para explicar la inversión de los espectros, concluyó: «Cuando la fuente de luz de un espectro continuo, por medio de la cual se debe invertir el espectro de un gas emisor [que las líneas brillantes se conviertan en oscuras], es un cuerpo emisor, su temperatura ha de ser superior a la del gas». De ello dedujo que el Sol debía constar de «un núcleo sólido o líquido tan caliente que resplandece, y el cual se halla rodeado por una atmósfera a menor temperatura».

Sus hallazgos acabaron con el punto de vista defendido entonces por algunos astrónomos. Según este, el Sol constaría de un núcleo oscuro —visible a través de las manchas observadas en la estrella— sobre cuya superficie podrían vivir seres parecidos a los terrestres. La fría superficie del núcleo solar estaría rodeada por una atmósfera opaca sobre la que se elevaría la atmósfera luminosa (la fotosfera). Con sus leyes sobre la radiación, sin embargo, Kirchhoff mostró que la fotosfera tenía que radiar tanto hacia el exterior como hacia el interior, y que, cuanto más opaca fuese la presunta atmósfera subyacente, tanto más deprisa se calentaría, por lo que el núcleo solar resplandecería enseguida. Con respecto a las manchas solares, Kirchhoff argumentó que debían ser «nubes» a menor temperatura.

Líneas de laboratorio

Desplazamiento al rojo

Desplazamiento al azul

EFECTO DOPPLER: El movimiento relativo entre la fuente y el observador provoca que las líneas espectrales (*arriba*) se desplacen hacia el rojo cuando el objeto se aleja (*centro*) y hacia el azul cuando se acerca (*abajo*). El fenómeno, predicho en 1842 por el físico Christian Doppler, se ha convertido desde entonces en una herramienta fundamental en astrofísica y cosmología.

STERNE UND WELTRAUM (inversión de líneas); NASA (efecto Doppler)

EL CUERPO NEGRO

Pero Kirchhoff llevó más lejos su idea de que los cuerpos que radiaban con intensidad debían ser también potentes emisores. Un experimento mental le llevó a concebir el hoy célebre cuerpo negro: un emisor perfecto consistente en una cavidad de paredes opacas a idéntica temperatura. Con independencia de la forma y las propiedades de las paredes, cada punto del interior

emitiría tanta energía como la que absorbiese. Si en las paredes se efectuaba una pequeña abertura para que la radiación escapase al exterior, la intensidad radiada B dependería únicamente de la temperatura T y de la longitud de onda λ de la luz. Es decir, la magnitud B solo podría ser una función de esas dos variables, $B = B(T, \lambda)$. El material y la geometría no desempeñarían ningún papel.

El laboratorio de Kirchhoff carecía de los medios necesarios para determinar experimentalmente la función $B(T, \lambda)$, y el físico tampoco podía calcularla; otros reconocidos científicos de su tiempo se empeñaron igualmente en vano. La distribución de intensidades de una cavidad radiante solo se midió con exactitud 35 años después; entre otros lugares, en el Instituto Imperial Físico-Técnico de Berlín. En 1900, Max Planck, antiguo estudiante de Kirchhoff, logró derivar una distribución de intensidades $B(T, \lambda)$ que reproducía los resultados empíricos. Para ello, hubo de extender las leyes clásicas y postular que la absorción y la emisión de radiación tenían lugar mediante pequeños paquetes de energía, o «cuantos», lo que le llevó a introducir su «cuanto de acción», $h = 6{,}63 \cdot 10^{-35}$ julios · segundo.

Así pues, la teoría cuántica siguió a las leyes de Kirchhoff, que a su vez fueron motivadas por el estudio de las líneas de Fraunhofer. La curiosidad científica de aquella época ha conducido desde entonces a un sinnúmero de nuevas ideas y aplicaciones prácticas que hoy hacen posible nuestro nivel de vida.

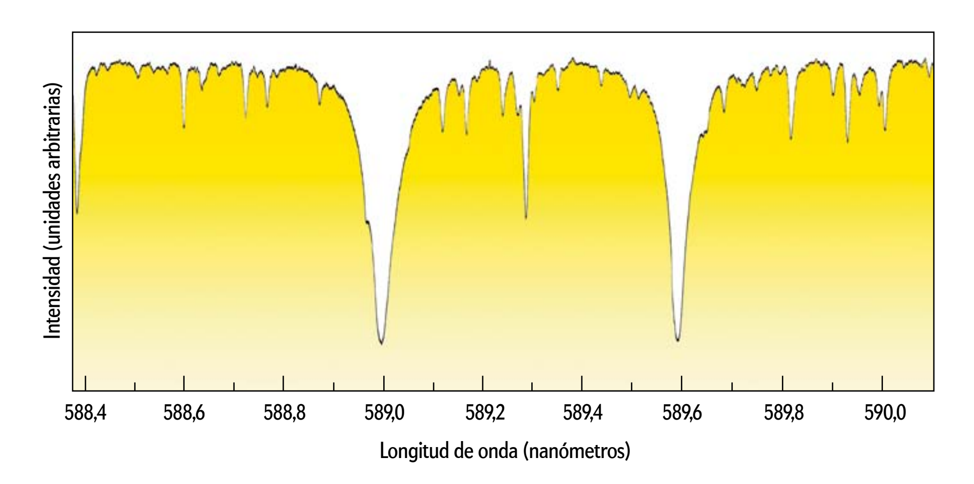
EL EFECTO DOPPLER

Unos veinte años antes de las investigaciones de Kirchhoff y Bunsen, el físico Christian Doppler elaboró en Praga una nueva teoría que poco después haría contacto con los espectros estelares de Fraunhofer. En 1842, una vez que se impuso la teoría ondulatoria de la luz, Doppler predijo que, si una fuente luminosa o sonora se acercaba al observador o se apartaba de él, su movimiento tendría que modificar la longitud de onda: «De hecho, nada parece más inteligible que, para un observador, el camino y el tiempo transcurrido entre dos pulsaciones consecutivas de una onda se acorten cuando el observador se mueve hacia la onda y se alarguen cuando se aleja de ella», escribió el investigador. En la época de las diligencias, sin embargo, aquella predicción difícilmente podía ponerse a prueba para las ondas acústicas, ya que el sonido avanza unas cien veces más rápido que un carruaje.



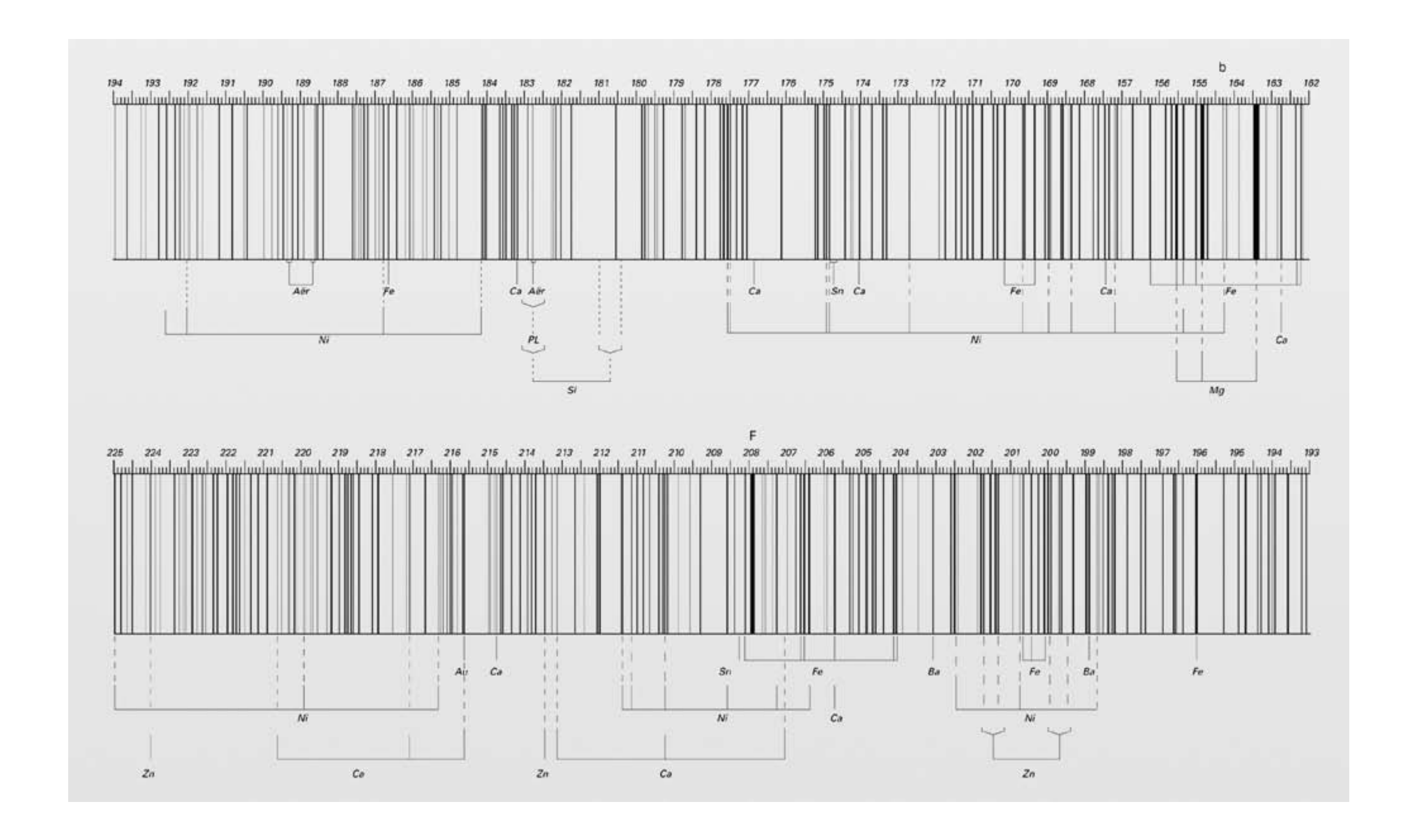
GRACIAS A UN ESPECTRÓMETRO de cuatro prismas (*arriba*) fabricado por el óptico muniqués Carl August Steinhell, Kirchhoff dibujó un espectro solar de 250 centímetros de largo con 1500 líneas oscuras (*página opuesta*). En él, la línea *F* de Fraunhofer, de 486 nanómetros, aparece rodeada por numerosas líneas de absorción. Pocos años después, en Suecia, Anders Ångström demostró que las líneas *F* y *C* correspondían a líneas de absorción del hidrógeno. El helio, segundo elemento más abundante en el Sol, no exhibe líneas de Fraunhofer.

Doppler pensó en verificar su efecto por medio de observaciones astronómicas. De hecho, concluyó que el fenómeno sería el responsable de los distintos colores que había advertido en las estrellas dobles (de rojo y naranja a violeta y azul). No obstante, se trataba de un mal ejemplo. El físico había supuesto que todas las estrellas eran blancas y que la «desaparición» de los colores rojo y azul en los miembros de los sistemas dobles se debía a su movimiento: una conclusión a la que no habría llegado de haber conocido los trabajos de Fraunhofer sobre los diferentes espectros estelares. Además, las bandas infrarroja y ultravioleta adyacentes al visible también se conocían desde hacía tiempo. Los astrónomos rechazaron la «prueba» de Doppler, pues las estrellas orbitaban mucho más despacio de lo que él había supuesto, por



ESPECTROSCOPÍA DE PRECISIÓN: Una de las líneas de Fraunhofer más intensas es la línea amarilla *D*, situada en torno a los 589 nanómetros. El Atlas Solar de Utrecht, generado con un espectrómetro de red de alta resolución (600 líneas por milímetro), muestra que en realidad se trata de una línea doble cuyas componentes se encuentran separadas 0,6 nanómetros. Su origen se debe a las transiciones del electrón más externo del átomo de sodio.

ARCHIVO DE LA UNIVERSIDAD DE HEIDELBERG (*espectrómetro de cuatro prismas*); G. KIRCHHOFF, 1862 (*espectros*); M. MINNAERT ET AL./*STERNE UND WELTRAUM* (*espectro de 589 nm*)



lo que no cabía esperar tales cambios de color. Sin embargo, el astrónomo francés Armand Fizeau señaló en 1848 que el efecto sí debía manifestarse en forma de un desplazamiento de las líneas de Fraunhofer.

Tres años antes, en 1845, el meteorólogo holandés Buijs Ballot había confirmado el efecto Doppler para las ondas sonoras: cerca de Utrecht, hizo subir a un grupo de trompetistas a un tren de los ferrocarriles holandeses que circulaba a 70 kilómetros por hora; después, varios músicos de conservatorio situados junto a las vías escucharon la nota sol agudizada al acercarse el tren y más grave al alejarse. No obstante, que el mismo efecto pudiese observarse en las ondas de luz siguió sin estar claro durante muchos años.

Tras la muerte de Doppler en 1853, las estrellas dobles acabaron testimoniando a su favor, si bien de modo muy distinto al que el investigador había concebido. El ligero desplazamiento periódico de las líneas de Fraunhofer en los espectros de estrellas en órbita mutua permitió determinar con precisión su velocidad, de manera especialmente concluyente en el caso de las binarias eclipsantes. Hermann Vogel, del recién inaugurado Observatorio Astrofísico de Potsdam, verificó el efecto con la rotación solar después de que, en 1875, él mismo lo confirmara de manera impresionante con el silbato de una locomotora de vapor Borsig, más rápida. La verificación del efecto permitió aplicarlo de manera fiable a todos los movimientos en el cosmos, lo que decenios después permitiría inferir la expansión del universo.

Hasta principios del siglo xx, la ley de radiación de Kirchhoff y el efecto Doppler, dos hallazgos estimulados por el descubrimiento de Fraunhofer, permanecieron como los fundamentos de la recién constituida astrofísica. Con la teoría cuántica de Planck, la teoría de campos de radiación de Karl Schwarzschild y el modelo atómico de Bohr comenzó, a partir de 1913, un conocimiento cada vez más profundo de los espectros estelares basado en la física atómica. El cosmos se convirtió en un laboratorio para aquellos experimentos que no se podían llevar a cabo en la Tierra.

Para terminar, volvamos al protagonista de las dos partes de nuestra historia. Fraunhofer goza hoy de una reputación que mantiene vivo su nombre en todas partes. En 1949 se fundó en Alemania la Sociedad Fraunhofer, que desde sus humildes orígenes en Baviera ha crecido hasta convertirse en la mayor organización para la ciencia aplicada de Europa, con un total de 67 institutos. Su forma de trabajar sigue inspirándose en el método de Fraunhofer: emplear la investigación científica para concebir productos y procedimientos técnicos que puedan servir al ser humano.

PARA SABER MÁS

Joseph von Fraunhofer: Handwerker, Forscher, Akademiemitglied. G. D. Roth. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; Stuttgart, 1976.

Die Pioniere der Sternspektroskopie. R. Häfner y R. Riekher en *Beiträge zur Astronomiegeschichte*, vol. 6, págs. 137-165; dirigido por W. R. Dick y J. Hamel. Harri Deutsch; Fráncfort, 2003.

Ein Genie hat Geburtstag. Kippenhahn en *Sterne und Weltraum*, noviembre de 2003. Homenaje a Christian Doppler, disponible en **www.spektrum.de/magazin/ein-genie-hat-geburtstag/837672**

Gustav Robert Kirchhoff: Das gewöhnliche Leben eines außergewöhnlichen Mannes. K. Hübner. Verlag Regionalkultur; Ubstadt-Weiher, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

La carrera por el mayor refractor del mundo. Wolfgang Steinicke y Stefan Binnewies en *IyC*, enero de 2013.

Herschel y el rompecabezas de la radiación infrarroja. Jack R. White en *IyC*, octubre de 2013.

Fraunhofer y el estudio del espectro solar. Dietrich Lemke en *IyC*, enero de 2016.

ETOLOGÍA

ANIMALES QUE RENUNCIAN A LA REPRODUCCIÓN

Algunos miembros de sociedades complejas deciden no procrear y ayudan a otros en esa tarea. El estudio de esta conducta en peces de arrecifes coralinos sustenta nuevas ideas sobre la evolución de la cooperación

Peter M. Buston y Marian Y. L. Wong

El origen de las especies de Charles Darwin sentó las bases de la biología evolutiva y del conocimiento de la vida en la Tierra. Mientras se dedicaba a reunir las pruebas de la teoría de la selección natural, el científico quiso recalcar ciertas observaciones que parecían poner en entredicho sus ideas (extracto de la edición a cargo de Jaume Josa, Espasa y Calpe, 1988):

> «...me limitaré a una dificultad especial, que al principio me pareció insuperable y realmente fatal para toda la teoría. Me refiero a las hembras neutras o estériles de las sociedades de los insectos, pues estas neutras, frecuentemente, difieren mucho en instintos y conformación, tanto de los machos como de las hembras fecundas y, sin embargo, por ser estériles, no pueden propagar su clase.»

EN SÍNTESIS

Algunas especies animales conforman sociedades complejas en las que ciertos individuos renuncian a la reproducción y ayudan a otros congéneres en la crianza de la descendencia.

Esa conducta ha intrigado a los biólogos evolutivos porque contradice la teoría de la selección natural de Darwin. Desde hace tiempo se han planteado y contrastado hipótesis y modelos teóricos para desvelar los motivos del altruismo en la reproducción.

Los autores proponen un modelo nuevo según el cual los individuos acceden a cooperar porque tal comportamiento redundará en ventajas genéticas en el futuro, y no emprenden otras opciones egoístas dentro del grupo a causa de restricciones sociales.



EL PEZ PAYASO convive en sociedades complejas en las que un reducido número de individuos renuncia a la reproducción. Los grupos entablan una estrecha asociación con las anémonas de mar.

Peter M. Buston es profesor de etoecología y biología marina en la Universidad de Boston. Investiga la cooperación, el conflicto y los mecanismos de negociación en las sociedades animales, así como la dispersión de las larvas y la conectividad entre las poblaciones de peces marinos.

Marian Y. L. Wong es profesora de etoecología y biología marina en la Universidad de Wollongong. Su labor se centra en estudiar el comportamiento social y reproductor en las sociedades animales, así como en la aplicación de ese conocimiento para la conservación de los peces marinos y continentales.

En las sociedades de insectos a las que aludía Darwin, como las hormigas o las termitas, impera la división del trabajo según la capacidad reproductora: algunos individuos renuncian a la procreación para ayudar a otros en esta labor. Para expresar la contrariedad de Darwin en un lenguaje moderno, tales sociedades resultan difíciles de entender porque, a primera vista, no está claro de qué modo la selección natural puede preservar los genes que se ocultan tras la conducta que inhibe el instinto reproductor y lleva a colaborar con los congéneres que sí procrearán. Este tipo de comportamientos ha intrigado a los biólogos evolutivos desde que el propio Darwin subrayara la paradoja que representaban para su teoría de la selección natural.

Los insectos sociales ofrecen ejemplos extremos de esa conducta, pero las aves y los mamíferos gregarios también presentan otros similares, aunque no tan drásticos. El etoecólogo Paul W. Sherman, de la Universidad Cornell, y otros expertos opinan incluso que la única diferencia entre los insectos y los vertebrados sociales reside en el grado de socialidad, que puede variar a lo largo de un espectro continuo. Por ejemplo, aves como el abejaruco frentiblanco (*Merops bullockoides*) y mamíferos como la rata topo lampiña (*Heterocephalus glaber*) conforman sociedades complejas en las que algunos individuos renuncian a la reproducción y ayudan a otros congéneres en esta faceta, cuando menos en algún momento de la vida. La antropóloga Sarah B. Hrdy, de la Universidad de California en Davis, y otros expertos opinan que la cooperación en la reproducción también pudo ser fundamental para la evolución humana, al ayudar a sostener nuestras largas y atípicas historias vitales [*véase* «La receta humana de la crianza», por Ana Mateos; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014].

Los vertebrados sociales han resultado imprescindibles para concebir y verificar las teorías de la evolución social. Muchos de ellos demuestran una enorme flexibilidad en el comportamiento, lo que posibilita la manipulación de variables clave y el análisis de las respuestas individuales. En los años ochenta del siglo xx, Stephen T. Emlen, de la Universidad Cornell, presentó un marco teórico evolutivo para entender las estrategias de cooperación y supresión de la reproducción a partir de estudios con aves y mamíferos que practican la crianza cooperativa. Este modelo sigue siendo un referente para gran parte de la investigación actual. Emlen señaló que para entender la reproducción cooperativa era necesario responder

TONY CAMACHO/SCIENCE SOURCE (*abejarucos*); NEIL BROMHALL/SCIENCE SOURCE (*ratas topo*)

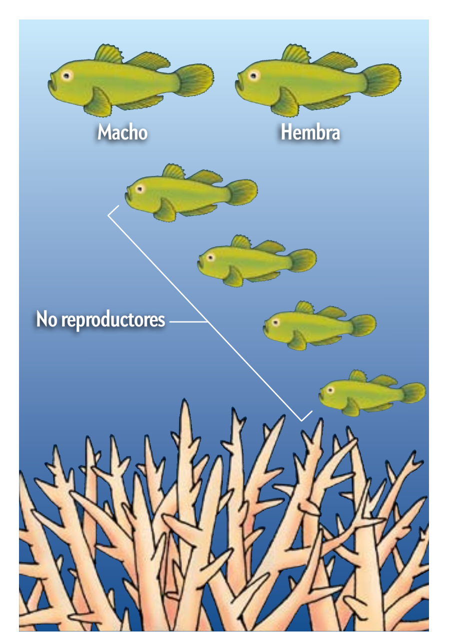


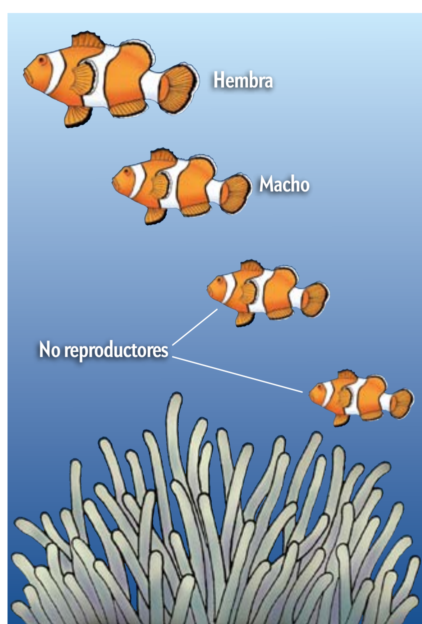


AYUDAR A LOS FAMILIARES: Los grupos sociales de abejarucos frentiblancos (*izquierda*) y de ratas topo lampiñas (*derecha*) acogen miembros que no procrean por un tiempo y ayudan a sacar adelante las crías de las parejas reproductoras. El estudio de estas especies de aves y mamíferos, entre otros, ha demostrado que la evolución de tales comportamientos está condicionada por la selección por parentesco y las restricciones ecológicas.



TAMAÑO CORPORAL Y REPRODUCCIÓN: En el gobio coralino (*arriba*), el macho y la hembra son de talla pareja y los individuos no reproductores son progresivamente más pequeños (*centro*). En el pez payaso, la hembra es algo más grande que el macho y los peces no reproductores son también más pequeños (*derecha*).





CORTESÍA DE JOÃO PAULO KRAJEWSKI (*gobio coralino*); SIGMMA XI/AMERICAN SCIENTIST (*esquemas*)

a dos grandes preguntas: ¿por qué ayudan los individuos? y ¿por qué no se dispersan para procrear en otro lugar? La primera se centra en la ventaja reproductora que adquieren los animales gracias a sus decisiones, y la segunda en el rédito que obtendrían actuando de otro modo. El modelo hace énfasis en dos de los principales motivos por los que habrían evolucionado los comportamientos de colaboración e inhibición de la reproducción: la selección por parentesco y las restricciones ecológicas (*véase el recuadro* «Modelo evolutivo del comportamiento cooperativo»).

SOCIEDADES DE PECES CORALINOS

Debido a que tal modelo se elaboró a partir de estudios con aves y mamíferos, no está claro si puede ser extrapolable a otras clases zoológicas. A fin de averiguarlo, hemos dedicado casi dos décadas al estudio de las sociedades complejas de dos moradores de los arrecifes coralinos: el pez payaso *Amphiprion percula*, en la laguna de Madang (Papúa Nueva Guinea), y el gobio esmeralda *Paragobiodon xanthosomus*, en la isla de los Lagartos (Australia).

Las sociedades de ambos peces guardan similitudes sorprendentes con las comunidades complejas de aves y mamíferos. Grupos de individuos entablan un estrecho lazo con invertebrados (anémonas o corales), que actúan como anfitriones al ofrecerles cobijo contra los depredadores. Cada anfitrión acoge un grupo de peces formado por una pareja reproductora y un reducido número de individuos que no procrean. Todos se rigen por una jerarquía definida por el tamaño: los adultos reproductores son los más voluminosos y los no reproductores exhiben tamaños progresivamente más pequeños. Como tantos otros peces coralinos, ambas especies son hermafroditas. El macho de pez payaso puede convertirse en hembra y la hembra de gobio puede hacer a la inversa.

Mediante el estudio de esos peces, hemos analizado la solidez del modelo vigente sobre la evolución de la reproducción cooperativa a fin de obtener nuevas pruebas sobre la evolución social. Sobre la base de nuestras investigaciones y las de otros grupos, presentamos aquí un nuevo modelo, sencillo pero ampliado, que incluye otros dos motores importantes de los comportamientos de colaboración e inhibición de la reproducción.

SELECCIÓN POR PARENTESCO EN AVES Y MAMÍFEROS

La teoría de la selección por parentesco, o familiar, formulada por el biólogo evolutivo William D. Hamilton en los años sesenta, afirma que los individuos pueden transmitir sus genes a la siguiente generación de dos formas: por vía directa, engendrando hijos, o por vía indirecta, colaborando en la procreación de los familiares. La selección por parentesco favorece a los familiares que ayudan porque la descendencia comparte también con ellos una parte de sus genes. Esta hipótesis hace dos predicciones esenciales: que los altruistas mejoran la eficacia biológica de los reproductores y, además, son parientes próximos de estos.

A finales de los años ochenta, el estudio del abejaruco frentiblanco, un pájaro autóctono de Kenia y Tanzania que nidifica en colonias, sustentó ambas predicciones: en promedio, cada ayudante de la pareja progenitora permite sacar adelante medio polluelo más, y los ayudantes suelen ser los hijos mayores de la pareja. En la actualidad existe un gran volumen de datos que demuestran que los altruistas mejoran la eficacia biológica de los parientes cercanos y, en consecuencia, que la selección por parentesco explica muchos de los ejemplos de comportamiento cooperativo observados en las aves y en los mamíferos sociales.

RESTRICCIONES ECOLÓGICAS EN VERTEBRADOS

La teoría de las restricciones ecológicas formalizada por Emlen recalca que los individuos tienen dos alternativas: dispersarse a otros lugares y criar, o permanecer en el territorio natal sin procrear y colaborar en la crianza de los hermanos. Son muchos los factores que tienen cabida en el término genérico «restricción ecológica». La permanencia puede ser favorecida bien por la superpoblación y la ocupación de todos los territorios de calidad, o bien por el peligro de depredación que conlleva el traslado a otras zonas habitables. La hipótesis formula tres predicciones: que los individuos no se reproducen si están sometidos a una restricción ecológica; que las probabilidades de dispersión para procrear aumentan cuando la restricción ecológica pierde intensidad; y que la competencia por ocupar un puesto de reproductor se intensifica cuando surgen vacantes en el hábitat.

PARIENTES Y ENTORNO

Modelo evolutivo del comportamiento cooperativo

La evolución del comportamiento cooperativo depende del coste y del beneficio de las acciones cooperativas y alternativas para el altruista y sus parientes: el altruismo puede verse favorecido por sus efectos beneficiosos sobre los familiares (selección por parentesco) y por los efectos perjudiciales que conllevarían las acciones alternativas (restricciones ecológicas). El comportamiento favorecido por la selección puede determinarse con la ecuación llamada regla de Hamilton. En particular, la acción cooperativa *i* prevalecerá sobre la acción alternativa *j* si:

$$X_i + r_i Y_i > X_j + r_j Y_j$$

donde X_i (o X_j) es el número de descendencia asociada con la acción *i*-ésima (*j*-ésima) del altruista, Y_i (Y_j) es el número de descendientes del beneficiado, y *r* es la probabilidad de que dos individuos compartan una copia del mismo gen por descendencia. Los términos *r* reflejan el efecto de la selección por parentesco; los términos *j*, el efecto de las restricciones ecológicas. La teoría de la selección por parentesco de Hamilton demostró de qué modo el altruismo pudo aparecer en grupos de parientes próximos y ofrece una solución al problema de Darwin.

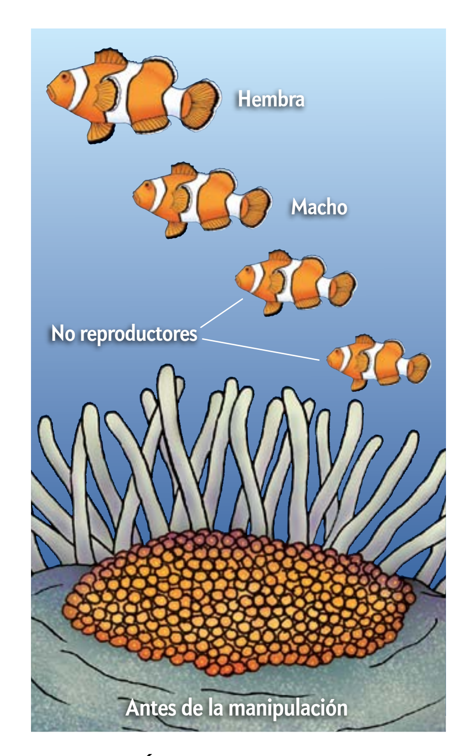
A caballo de las décadas de los ochenta y noventa, el estudio de la rata topo lampiña, un roedor subterráneo de Etiopía, Somalia y Kenia, aportó pruebas de la primera y la tercera predicción: las condiciones áridas y la escasez de alimento (bulbos y tubérculos) reducen las ventajas de criar en otros lugares, por lo que la competencia por ocupar el puesto de los adultos reproductores que mueren es intensa y a veces sangrienta. Estudios posteriores han aportado un notable volumen de datos experimentales y observacionales que avalan las tres predicciones y demuestran que las restricciones ecológicas explican muchos casos de supresión de la reproducción. En las aves y los mamíferos, los comportamientos cooperativos y la ausencia de reproducción van a menudo de la mano, porque cuando las opciones para procrear son escasas el individuo puede permanecer en el hogar y ayudar a sus parientes en la crianza.

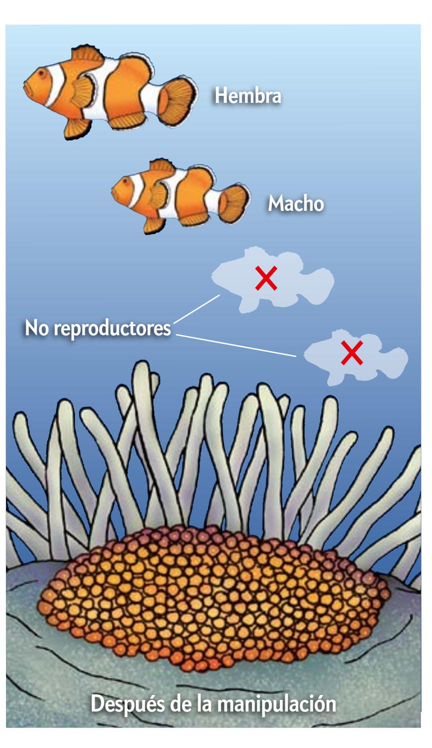
SELECCIÓN POR PARENTESCO EN PECES CORALINOS

Orientados por el modelo evolutivo, comenzamos a indagar si los peces payaso que no se reproducen, cuando reprimen su instinto de perpetuación y ayudan a sacar adelante las crías de otros, ganan beneficios genéticos indirectos.

Para comprobar la validez de las predicciones de esta hipótesis, pasamos un año entero en Papúa Nueva Guinea realizando inmersiones diarias para registrar la supervivencia y la reproducción en 71 grupos de peces payaso de dos arrecifes. (Parece estupendo, pero los brotes de paludismo y las extrañas infecciones por hongos no hacen recomendable la experiencia para aprensivos.) Como complemento de este seguimiento, efectuamos un experimento en el que retiramos todos los peces no reproductores de 14 de los 71 grupos y analizamos el efecto de su ausencia sobre la eficacia biológica de los reproductores.

Al cabo de dos años más de compilación de datos y análisis estadísticos, nos encontramos frente a frente con un resultado intrigante: los peces no reproductores no influían ni en la supervivencia ni en la procreación de los reproductores. Es más, los análisis genéticos demostraron que no presentaban un parentesco próximo con los reproductores, sino que habían llegado allí desde su territorio natal cuando eran larvas recién nacidas. Considerados en conjunto, estos resultados indican algo notable: la selección por parentesco, uno de los conceptos fundamentales de la evolución social, no cumpliría función alguna en la conformación de esas sociedades de peces.





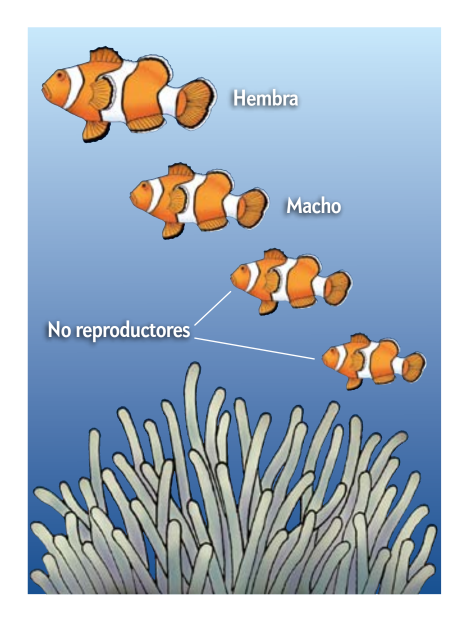
LA SELECCIÓN POR PARENTESCO no siempre explica las conductas altruistas, como se ha comprobado en los peces payaso. Mediante experimentos se ha demostrado que la eliminación de los individuos que no procrean no reduce el número de huevos incubados por la pareja reproductora; además, los grupos no están compuestos por parientes cercanos.

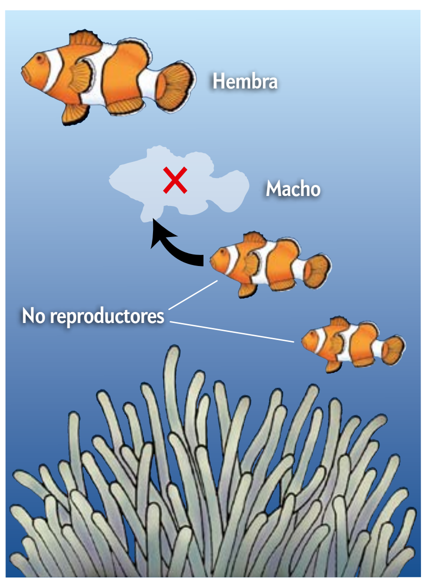
SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

BENEFICIOS EN EL FUTURO

Si los individuos que no se reproducen no obtienen ninguna ventaja genética indirecta, su contribución genética a la generación siguiente debe adoptar otra forma; de lo contrario, la selección natural extinguiría su comportamiento. Entre los años setenta y ochenta, el estudio de la chara floridana (*Aphelocoma coerulescens*) por los ornitólogos Glen E. Woolfenden y John W. Fitzpatrick sacó

ESPERAR A UN MEJOR TIEMPO: Para entender las ventajas de la permanencia en un grupo sin procrear, retiramos los machos reproductores de grupos de peces payaso para observar qué machos subalternos ocupaban la vacante. Sin excepción, el subalterno residente más grande la ocupó y se reprodujo, lo cual demuestra las ventajas de aguardar el turno para heredar la posición de reproductor. Los gobios coralinos muestran pautas casi idénticas para la herencia del territorio.



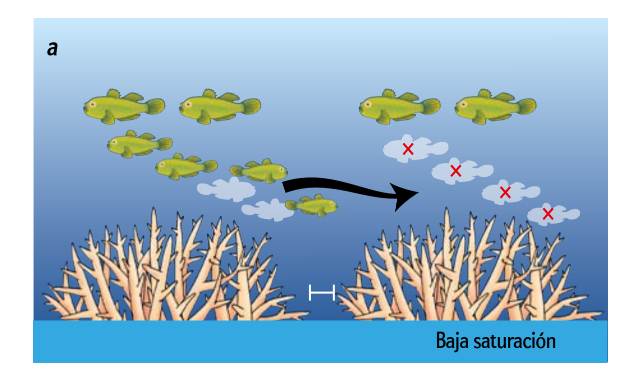


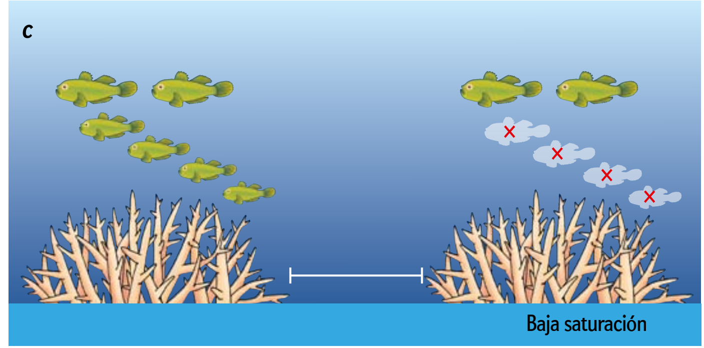
a relucir la posibilidad de que los individuos que no criaban obtuvieran beneficios directos en el futuro, al heredar el territorio de los reproductores tras su muerte. La idea puede formularse de un modo análogo a la selección por parentesco (*véase el recuadro* «Modelo modificado del comportamiento cooperativo»).

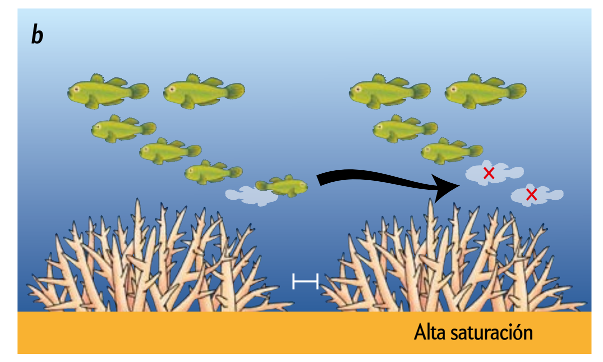
Para averiguar si la selección a futuro favorece el comportamiento del pez payaso, pusimos a prueba dos predicciones básicas: que el individuo no reproductor más grande del grupo heredará el territorio (la anémona) cuando el reproductor dominante muera; y que la vacante no será usurpada por otros peces no reproductores más pequeños de la misma anémona o procedentes de otro lugar.

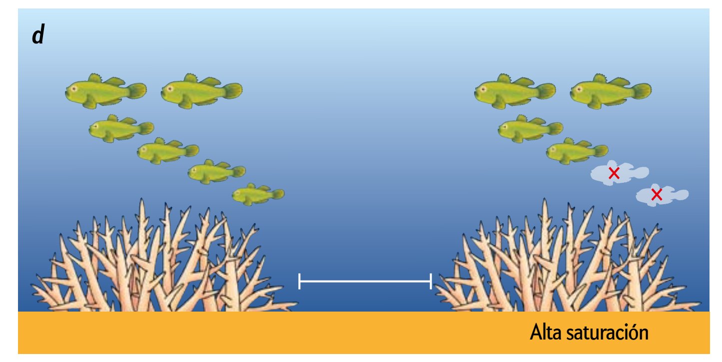
Con el fin de comprobar esas predicciones examinamos 57 de las 71 colonias y registramos la ocupación de las vacantes por sus miembros a medida que estas surgían. Completamos las observaciones con un experimento consistente en eliminar los machos reproductores de 16 grupos de un tercer arrecife y determinar qué individuos de los 26 grupos de ese arrecife ocupaban las vacantes.

Los resultados no dejaron lugar a dudas: el pez no reproductor de mayor tamaño heredó sin excepción el puesto de la colonia; la vacante nunca fue usurpada por un individuo más pequeño de la anémona o de otra colonia. Dicho de otro modo,









SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

EFECTO DE LAS RESTRICCIONES ECOLÓGICAS: Para esclarecer los costes del abandono de un grupo social en los gobios, se manipuló la distancia entre los grupos y el número de individuos no reproductores (peces pequeños). Las distancias grandes entre los hábitats comportan más riesgo de depredación si se opta por la dispersión, y la abundancia de no reproductores supone un mayor nivel de superpoblación. La dispersión de subordinados fue máxima (cerca del 30 por ciento de los no reproductores) cuando la distancia y la saturación era baja (*a*), pero también se observó cierta dispersión (del 15 por ciento) en distancias cortas y con alta saturación del hábitat (*b*). Cuando la distancia entre los hábitats era grande (100 centímetros) casi ninguno optó por marchar, con independencia de la saturación del medio (*c* y *d*).

los candidatos establecen una estricta línea sucesoria para reemplazar los puestos de reproductor. Estos resultados constituyen una de las demostraciones más claras (sin el sesgo generado por la selección por parentesco) de que los individuos únicamente asumirán el papel de no reproductor por la expectativa de acabar procreando en el futuro.

RESTRICCIONES ECOLÓGICAS EN PECES

Los beneficios que los peces no reproductores adquirirán cuando hereden los territorios son necesarios pero no bastan para explicar ese comportamiento. También se requiere saber por qué no abandonan el lugar y crían en otra zona.

Para averiguar si las restricciones ecológicas condicionan tal conducta pusimos a prueba dos predicciones fundamentales: la probabilidad de dispersión aumentará con la disponibilidad de hábitats adecuados y disminuirá si crece el riesgo de los desplazamientos. Analizamos si la disponibilidad de hábitats favorecía la dispersión mediante la creación de vacantes, tras retirar machos e individuos no reproductores de 30 de los 97 grupos de pez payaso. La distancia que separaba los grupos manipulados de los grupos vecinos variaba desde apenas un metro hasta un centenar. Los peces payaso no se dispersaron a otras anémonas, aunque la manipulación conllevara una menor saturación del hábitat.

Para mayor convicción, llevamos a cabo otro experimento con gobios esmeralda en el que modificamos la saturación del medio y el riesgo de los desplazamientos en 31 pares de hábitats coralinos. El desplazamiento de un coral a otro expone a los gobios a caer presa de un depredador, riesgo que aumenta con la distancia entre los corales. En esta especie de pez, la probabilidad de dispersión aumentó en paralelo con la disponibilidad de un hábitat idóneo y descendió si el riesgo del traslado aumentaba. Además, la probabilidad de que los individuos no reproductores se trasladaran de un coral experimental a otro fue nula, aunque estos solo se hallaran separados entre sí un metro, una distancia muy inferior a la que suele observarse en la naturaleza.

En conjunto, los resultados evidencian la importancia de las restricciones ecológicas en la evolución de la supresión de la reproducción en los peces coralinos, a semejanza de lo que ocurre en las aves y los mamíferos. Sin embargo, en los peces la inhibición de la reproducción tiende a ir de la mano de la línea sucesoria y no de la colaboración, porque cuando las opciones de procrear escasean la única forma de hacerlo es asentarse en un territorio y esperar a heredar uno de los puestos de reproductor.

RESTRICCIONES SOCIALES

Las ventajas futuras y las restricciones ecológicas bastan para explicar por qué los individuos esperan heredar un puesto de reproductor en vez de marchar a otro lugar. Pero no resuelven otra pregunta desconcertante: ¿por qué los individuos esperan a recibir una posición de reproductor, en lugar de pugnar por ella? Una posibilidad es que existan restricciones sociales (un concepto análogo al de restricción ecológica) que reduzcan la ventaja reproductora de otras acciones dentro del grupo (*véase el recuadro* «Nuevo modelo evolutivo del comportamiento cooperativo»).

Un ejemplo de restricción social sería el riesgo de endogamia apuntado por los etoecólogos Walter A. Koenig y Frank A. Pitelka, a la sazón en la Universidad de California en Berkeley, a raíz del estudio del carpintero bellotero (*Melanerpes formicivorus*), ave que vive en grupos familiares. Si conseguir uno de los contados puestos de reproductor por competición implica el apareamiento con parientes, y la endogamia reporta desventajas reproductoras, entonces la selección podría favorecer el apareamiento con otro congénere no emparentado en lugar de con un pariente. El riesgo de endogamia es solo uno más de los factores englobados en el término genérico «restricciones sociales», puesto que puede haber muchos tipos de ellas.

A fin de averiguar si las restricciones sociales favorecen la paciente espera del pez payaso y del gobio esmeralda, comenzamos a pensar en qué podrían consistir tales restricciones. En nuestro prolongado estudio de campo del pez payaso observamos que los individuos dominantes expulsaban de vez en cuando a sus subordinados inmediatos cuando la diferencia de tamaño entre ambos era pequeña. Además, descubrimos que la razón de tamaños entre individuos de rangos adyacentes, lejos de ser aleatoria, presentaba un valor bien definido, el cual parecía ser mantenido por los subordinados al regular su propio crecimiento.

La idea de que un vertebrado modificara su crecimiento en respuesta al contexto social despertó (y todavía despierta) gran asombro entre los especialistas. Aún hoy no sabemos exactamente cómo lo hacen, pero parece que reducen por sí solos la ingesta, un fenómeno que podría calificarse como ayuno o dieta, al menos en los gobios esmeralda. Se ignora hasta qué punto las aves y los mamíferos sociales regulan la ingesta, el crecimiento y la talla corporal en respuesta al contexto social, aunque se han constatado pautas interesantes en las ratas topo, los suricatas y los humanos.

La observación de las expulsiones y la existencia de razones de tamaño bien definidas nos llevaron a elaborar tres hipóte-

COMPENSACIONES FUTURAS

Modelo modificado del comportamiento cooperativo

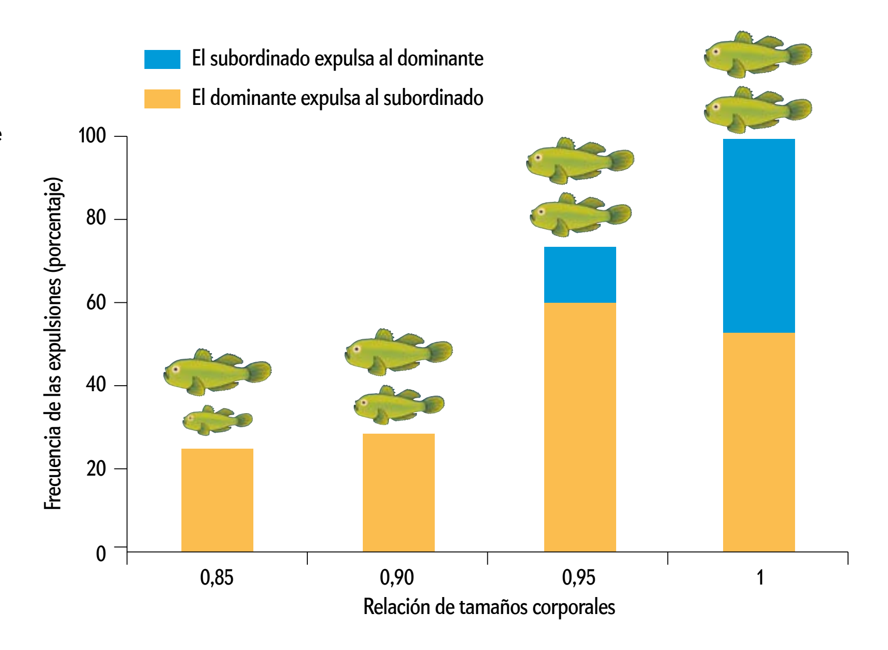
Sin la intervención de la selección por parentesco, la evolución del comportamiento cooperativo depende de los costes y beneficios actuales y futuros de las acciones cooperativas o alternativas: la selección tal vez favorezca el altruismo debido a sus efectos ventajosos en el futuro (selección a futuro) o a causa de restricciones ecológicas.

Es posible determinar el comportamiento favorecido por la selección con una ecuación que hemos denominado la «regla de futuro». En particular, la acción cooperativa *i* prevalecerá sobre la acción alternativa *j* si:

$$X_i + f_i Z_i > X_j + f_j Z_j$$

donde X_i (X_j) es el número de descendientes asociados con la acción *i*-ésima (*j*-ésima) del individuo, Z_i (Z_j) es el número de descendientes asociados con la acción *i*-ésima (*j*-ésima) del individuo en el futuro, y *f* es la probabilidad de que tales beneficios se materialicen. Los términos *f* reflejan el efecto de la selección a futuro y los términos *j* el efecto de las restricciones ecológicas. El concepto de selección a futuro revela por qué los comportamientos de cooperación e inhibición de la reproducción pudieron evolucionar en los grupos en ausencia de la selección por parentesco.

COOPERACIÓN BASADA EN RESTRICCIONES SOCIALES: Por medio de experimentos de confrontación entre pares de gobios coralinos no reproductores, comprobamos que la frecuencia de expulsión del grupo aumentaba a medida que la razón de tamaños entre los contendientes se acercaba a 1. El subordinado tiene una pequeña posibilidad de expulsar a su dominador (*azul*) si alcanza una talla pareja, pero no cuando es más pequeño. Las posibilidades de que el dominador expulse a su subordinado (*naranja*) se aumentan a más del doble cuando este alcanza una talla similar. Así pues, la expulsión es una amenaza creíble que impone la cooperación pacífica a través de la regulación del tamaño corporal de los subordinados.



sis complementarias. La primera propone que la selección favorecerá a los individuos dominantes, los cuales, en lugar de tolerar a los subordinados que alcanzan una talla similar a la suya, los expulsarán por el temor a caer destronados. La segunda plantea que, dada la amenaza de expulsión, la selección favorecerá a los subordinados que moderen su crecimiento y su talla. Y la tercera apunta que, debido a las diferencias de tamaño mantenidas, la selección favorecerá a los subordinados que esperan heredar la posición de reproductor, en lugar de luchar por ella.

Para averiguar si la restricción social existía y si la conducta observada en el subordinado se veía promovida a causa de ella, nos centramos en los gobios esmeralda para verificar si se cumplía una predicción crítica en cada una de las hipótesis: primero, la probabilidad de que los dominantes expulsen a los subordinados crecerá a medida que la talla de ambos se asemeje; segundo, los subordinados mantendrán una diferencia de tamaño con respecto a su dominador inmediato que no intente expulsarlos; y tercero, la probabilidad de que un subordinado ascienda de rango si aguarda su turno será mayor que la de ascender por la fuerza.

Con el fin de comprobar esas predicciones, organizamos 56 disputas entre pares de individuos no reproductores. Las parejas de contendientes se escogieron para que quedaran encuadradas en cuatro categorías (razón de tamaños alrededor de 0,85, 0,90, 0,95 o 1), donde la razón fue el resultado de dividir la talla del individuo más pequeño (el subordinado) por la del más grande (el dominante). Las parejas fueron liberadas en un coral desconocido para ambos individuos. El desenlace de cada disputa se calificó como expulsión del subordinado, expulsión del dominante o tablas.

En apoyo de la primera predicción, observamos que los dominantes eran más proclives a expulsar a los subordinados cuando la razón de tamaños tendía a 1. Y en apoyo de la segunda, vimos que la probabilidad de expulsión del subordinado era menor cuando la razón de tamaños de la pareja se asemejaba a la que imperaba en condiciones naturales (0,93). Por último, dada la razón de tamaños habitual en condiciones naturales, la probabilidad de que un subordinado logre ascender en el escalafón por la fuerza es efectivamente cero, mientras que la probabilidad de ascenso por sucesión en el momento de la muerte de uno de los dominantes es como mínimo de 0,66, suponiendo que la mortalidad no dependa del rango.

Considerados en conjunto, estos resultados constituyen una demostración palmaria de que los individuos adoptan estrategias de inhibición de la reproducción dentro del grupo a causa de una restricción social, en este caso, la velada amenaza de expulsión. Desde que se publicaron nuestros resultados, los zoólogos Tzo Zen Ang y Andrea Manica, de la Universidad de Cambridge, han descrito resultados parecidos en otros peces sociales de los arrecifes coralinos. El papel de las restricciones sociales en la cooperación animal, en particular de las amenazas ocultas, constituye en la actualidad un campo de investigación en auge.

SOPESAR LAS DISTINTAS OPCIONES

Darwin destacó la dificultad de encajar las conductas altruistas y la ausencia de reproducción en los insectos sociales dentro de su teoría y, desde entonces, generaciones enteras de biólogos han contrastado con rigor distintas hipótesis para desvelar los motivos por los que la selección natural podría favorecer ese tipo de comportamientos.

Desde mediados de los años sesenta hasta mediados de los noventa, los etoecólogos concibieron un modelo para intentar entender la evolución del comportamiento cooperativo y de la inhibición de la reproducción. Según este, los individuos estarían dispuestos a cooperar porque ello les reportaría ventajas genéticas indirectas, y descartarían las actitudes egoístas fuera del grupo a causa de restricciones ecológicas. El modelo se basó en el estudio de aves y mamíferos que practican la crianza cooperativa, lo cual plantea el interrogante de si las cosas funcionarían igual en otros dominios del reino animal.

Nuestro objetivo ha sido poner a prueba la generalidad de ese modelo evolutivo y abrir nuevas perspectivas mediante el análisis de las sociedades complejas de peces coralinos. Nuestras investigaciones, sumadas a las de muchos otros, nos han permitido ampliar ese marco teórico. El nuevo modelo propone que los individuos acceden a cooperar porque tal comportamiento redundará en ventajas genéticas en el futuro, y no emprenden otras opciones egoístas dentro del grupo a causa de restricciones sociales.

Para que la selección natural favorezca la evolución del comportamiento cooperativo a través de la selección por parentesco o la selección a futuro, el individuo debe tener la ca-

FIGURA ADAPTADA DE «THE THREAT OF PUNISHMENT ENFORCES PEACEFUL COOPERATION AND STABILIZES QUEUES IN A CORAL-REEF FISH», M. Y. L. WONG, ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON, SERIES B,* VOL. 274, PÁGS. 1093-1099, 2007

INTEGRACIÓN DE CONCEPTOS

Nuevo modelo evolutivo del comportamiento cooperativo

La selección tal vez favorezca el comportamiento cooperativo por la selección por parentesco o la selección a futuro; dicho comportamiento puede ser favorecido por los efectos perjudiciales de las acciones alternativas fuera (restricciones ecológicas) o dentro del grupo (restricciones sociales). En particular, la acción cooperativa *i* prevalecerá sobre otras acciones egoístas alternativas *j* y *k* si se cumplen simultáneamente dos desigualdades:

$$X_i + r_iY_i + f_iZ_i > X_j + r_jY_j + f_jZ_j$$
$$X_i + r_iY_i + f_iZ_i > X_k + r_kY_k + f_kZ_k$$

donde X_i (X_j o X_k) es el número de descendientes asociados con la acción *i*-ésima (*j*-ésima o *k*-ésima) del individuo en el presente; Y_i (Y_j o Y_k) es el número de descendientes del individuo beneficiado gracias a las acciones del altruista; *r* es la probabilidad de que los dos individuos compartan una copia de un mismo gen concreto por descendiente; Z_i (Z_j o Z_k) es el número de descendientes gracias a las acciones del individuo en el futuro, *y f* es la probabilidad de que tales beneficios se hagan realidad en el futuro. Los términos *r* reflejan el efecto de la selección por parentesco y los términos *f* el efecto de la selección a futuro. De modo similar, los términos *j* reflejan el efecto de las restricciones ecológicas y los términos *k* los efectos de las restricciones sociales.

En conjunto, los cuatro conceptos de selección por parentesco, selección a futuro, restricciones ecológicas y restricciones sociales ofrecen una visión más completa de la variedad de estrategias de cooperación observadas en las sociedades animales complejas.

El modelo evolutivo de la cooperación aquí presentado guarda un paralelismo sorprendente con la teoría económica de la negociación. Un extracto de la introducción del economista Abhinay Muthoo, de la Universidad de Warwick, a dicha teoría ayuda a ilustrar este extremo:

«Dos determinantes importantes de ese tipo de negociaciones (las maritales) son las opciones que cada individuo tiene dentro y fuera de la relación. Las opciones de fuera corresponden a las compensaciones que reportaría el divorcio, que podrían ser, por ejemplo, las propias de la soltería o las de una nueva pareja. Las opciones de dentro serían las compensaciones de seguir casado, pero con un comportamiento en general nada colaborador (como discusiones y peleas continuas).»

En nuestro modelo evolutivo ampliado, la compensación que conlleva la dispersión para procrear en otro lugar, influida por las restricciones ecológicas, es directamente análoga a la opción de «fuera» en la teoría de la negociación, la compensación por abandonar la relación cooperativa. De modo similar, la compensación por disputar el puesto de reproductor dentro del grupo, condicionada por las restricciones sociales, es directamente análoga a la opción de «dentro», esto es, la compensación derivada de comportarse de modo egoísta en la relación.

En el lenguaje de la teoría de la negociación, nuestro modelo evolutivo ampliado podría traducirse del siguiente modo: la selección favorecerá a los individuos que se comprometan en acciones cooperativas si la compensación por estas (ventajas genéticas directas, indirectas y futuras) es superior a la compensación de no cooperar y marchar fuera (dependiente de las restricciones ecológicas) o de no cooperar pero permanecer dentro (dependiente de las restricciones sociales). Las conductas de cooperación y de inhibición de la reproducción que se observan en las sociedades animales pueden parecer paradójicas a primera vista, pero adquieren sentido a la luz de las alternativas de que disponen los protagonistas.

pacidad de valorar o mejorar la probabilidad de obtener ventajas con la cooperación. Ello no significa que los individuos tengan que conocer la probabilidad de que un descendiente comparta un alelo idéntico con ellos o la probabilidad de que un acontecimiento se produzca en el futuro. En lugar de todo eso, deben contar con una regla sencilla (un sistema de reconocimiento de parentesco o de reconocimiento a futuro) que les permita evaluar esas probabilidades con un grado de certeza razonable y actuar en consecuencia. Los sistemas de reconocimiento de parentesco han sido objeto de una intensa investigación; en cambio, el estudio de los sistemas de reconocimiento a futuro está en pañales y supone una línea de investigación fascinante.

Creemos que la ampliación del modelo evolutivo para englobar cuatro conceptos básicos, a saber, la selección por parentesco, la selección a futuro, las restricciones ecológicas y las restricciones sociales, ofrece una perspectiva más completa de la diversidad de estrategias de cooperación y de inhibición de la reproducción en las sociedades animales complejas. De igual modo, esta perspectiva ampliada revela el camino hacia la unificación de los estudios de cooperación en las ciencias biológicas y sociales.

PARA SABER MÁS

Relatedness and inbreeding avoidance: Counterploys in the communally nesting acorn woodpecker. W. D. Koenig y F. A. Pitelka en *Science*, vol. 206, págs. 1103-1105, 1979.
A non-technical introduction to bargaining theory. A. Muthoo en *World Economics*, vol. 1, págs. 145-166, 2000.
Does the presence of nonbreeders enhance the fitness of breeders? An experimental analysis in the clown anemonefish *Amphiprion percula*. P. M. Buston en *Behavioural Ecology and Sociobiology*, vol. 57, págs. 23-31, 2004.
Mothers and others: The evolutionary origins of mutual understanding. S. B. Hrdy. Harvard University Press, 2009.
Ecological constraints and benefits of philopatry promote group living in a social but non-cooperatively breeding fish. M. Y. L. Wong en *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, vol. 277, págs. 353-358, 2010.
Social systems of habitat specialist reef fishes: Tests of key concepts in evolutionary ecology. M. Y. L. Wong, y P. M. Buston en *BioScience*, vol. 63, págs. 453-463, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ratas topo desnudas. Paul W. Sherman, J. U. M. Jarvis y Stanton H. Braude en *IyC*, octubre de 1992.
¿Por qué cooperamos? Martin A. Nowak en *IyC*, octubre de 2012.
Animales en red. Lee A. Dugatkin y Matthew Hasenjager en *IyC*, octubre de 2015.

por H. Joachim Schlichting



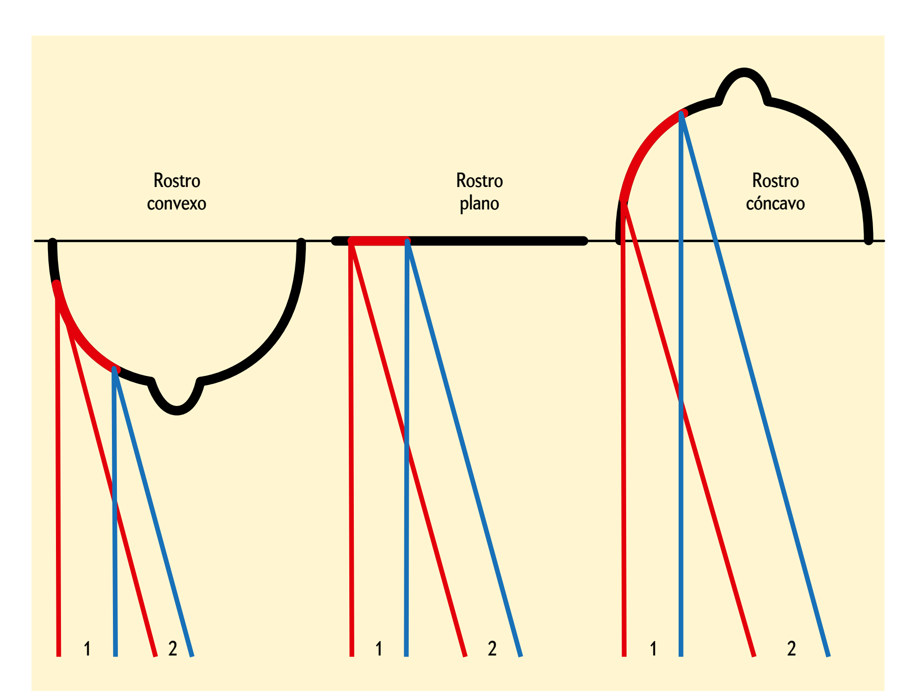
H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto para Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

Rostros huecos de mirada penetrante

Las máscaras de yeso con el rostro esculpido hacia el interior parecen seguirnos con la mirada. ¿A qué se debe?

Se cuenta que la *Gioconda* sigue con la mirada a quienes la contemplan. Dicho efecto se ha atribuido al ligero estrabismo de la *Mona Lisa*, pero no es en absoluto exclusivo del célebre retrato. Se da también cuando el personaje mira directamente a la cámara (o a los ojos del pintor) en el momento adecuado. Sin embargo, las vivencias más impactantes de este tipo las encontraremos en algunos objetos tridimensionales.

En 1984, mientras recorría la exposición *Phänomena* de Zúrich, donde se presentaban fenómenos y divertimentos científico-técnicos de todo tipo, de pronto algo me extrañó. Expuestos en una vitrina, unos rostros de yeso de mirada penetrante parecieron volverse hacia mí; a pesar de que, todo lo más, los estaba viendo con el rabillo del ojo.



MÁS RÁPIDO QUE EL OBSERVADOR: Los rostros convexos, planos y cóncavos son percibidos de manera distinta por un observador que se mueve del punto 1 al 2. La porción marcada en rojo en cada ejemplo (de la misma anchura aparente en todos ellos) parece acortarse en el primer caso, permanece igual en el segundo y se agranda en el tercero. Como consecuencia, nuestro sistema sensorial extrae conclusiones dispares. En el caso convexo, el rostro parece quedarse atrás y seguir mirando al frente; en el plano, aparentará seguirnos con la mirada. El rostro cóncavo produce la sensación más peculiar: el cerebro lo interpreta como uno convexo, por lo que parece girarse hacia el observador más rápido de lo que este se mueve (*véase el diagrama de la página opuesta*).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN EL AUTOR

Me detuve y me uní a otros visitantes que comentaban el sorprendente fenómeno. Entonces me di cuenta de que los supuestos bustos de yeso no eran tales. Se trataba de rostros huecos, esculpidos hacia dentro. Algunos de los allí presentes hablaban de un truco holográfico para explicar la ilusión, pero sin poder precisar qué querían decir con ello. Pronto quedó claro, sin embargo, que los efectos holográficos no tenían nada que ver.

¿Cómo se generaba entonces aquella ilusión? Para entenderlo, primero hemos de aclarar por qué percibíamos una forma cóncava, esculpida hacia dentro, como si se tratase de un rostro convexo, con estructuras salientes. Para comprobar este efecto basta con tomar una máscara de plástico con agujeros para la boca, la nariz y los ojos, y colocarla a la altura de nuestra mirada. Si observamos su lado hueco desde una cierta distancia o con un ojo cerrado, no podremos evitar verla como saliente. Y, si pasamos a su lado, experimentaremos la contradictoria sensación de vernos perseguidos por la mirada de una máscara sin ojos.

No cabe duda de que nuestros sentidos se toman algunas libertades a la hora de procesar situaciones ópticamente ambiguas. No obstante, si nos detenemos a reflexionar sobre el asunto, habremos de concluir que, a menudo, están obligados a hacerlo. Ello se debe a la manera en que percibimos espacialmente los objetos. Debido a la distancia que media entre nuestros ojos, vemos los cuerpos desde dos ángulos ligeramente distintos. Esa disparidad disminuye a medida que aumenta la distancia al objeto, lo que





MIRADA VIGILANTE: Quien pase de izquierda a derecha al lado de esta máscara hueca —prácticamente irreconocible como tal— de Ludwig van Beethoven se sentirá perseguido por su mirada.

hace que un busto tridimensional (cóncavo o convexo) ya no pueda distinguirse de su proyección bidimensional. El mismo efecto se produce cuando cerramos un ojo. El cerebro debe entonces fiarse de otras pistas no físicas para generar una impresión espacial. En general, opta por la solución más simple y concede preferencia al rostro saliente, dado que se trata de la versión más familiar. Pero, si viviéramos en un mundo de cabezas huecas, probablemente se decantaría por la interpretación opuesta.

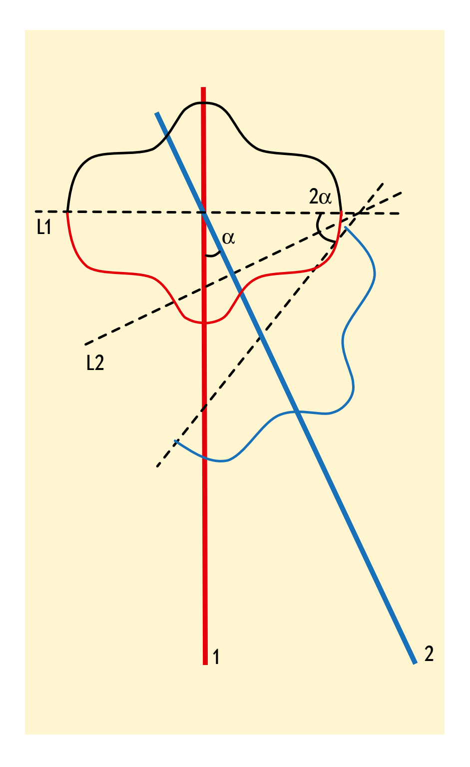
Cuando las figuras cobran vida

Así pues, ¿acaso no podemos diferenciar rostros planos, cóncavos y convexos desde una cierta distancia? No mientras permanezcamos quietos. Si nos movemos, sin embargo, las figuras cobrarán «vida», y lo harán de un modo que dependerá del tipo de relieve. Ello se debe a la paralaje, el fenómeno por el que objetos situados a diferentes distancias parecen desplazarse o cambiar de tamaño a medida que nos movemos. Al pasar junto a un árbol, nos da la impresión de que este se mueve con respecto al sol que se encuentra detrás. Los objetos lejanos, sin embargo, conservan siempre su posición relativa con respecto a nosotros; en otras palabras, parecen acompañar al observador.

Dado que la paralaje no puede eliminarse aunque aumente la distancia al objeto o lo observemos con un solo ojo, nuestro sistema sensorial debe procesarla como un fenómeno espacial propio. ¿Cómo lo consigue? Contemplemos de frente una máscara hueca, una plana y una saliente (*véase el esquema de la página opuesta*) y analicemos cómo se proyecta una porción de la misma anchura aparente. Si pasamos al lado de los rostros con la mirada dirigida hacia ellos, los percibiremos de forma muy distinta.

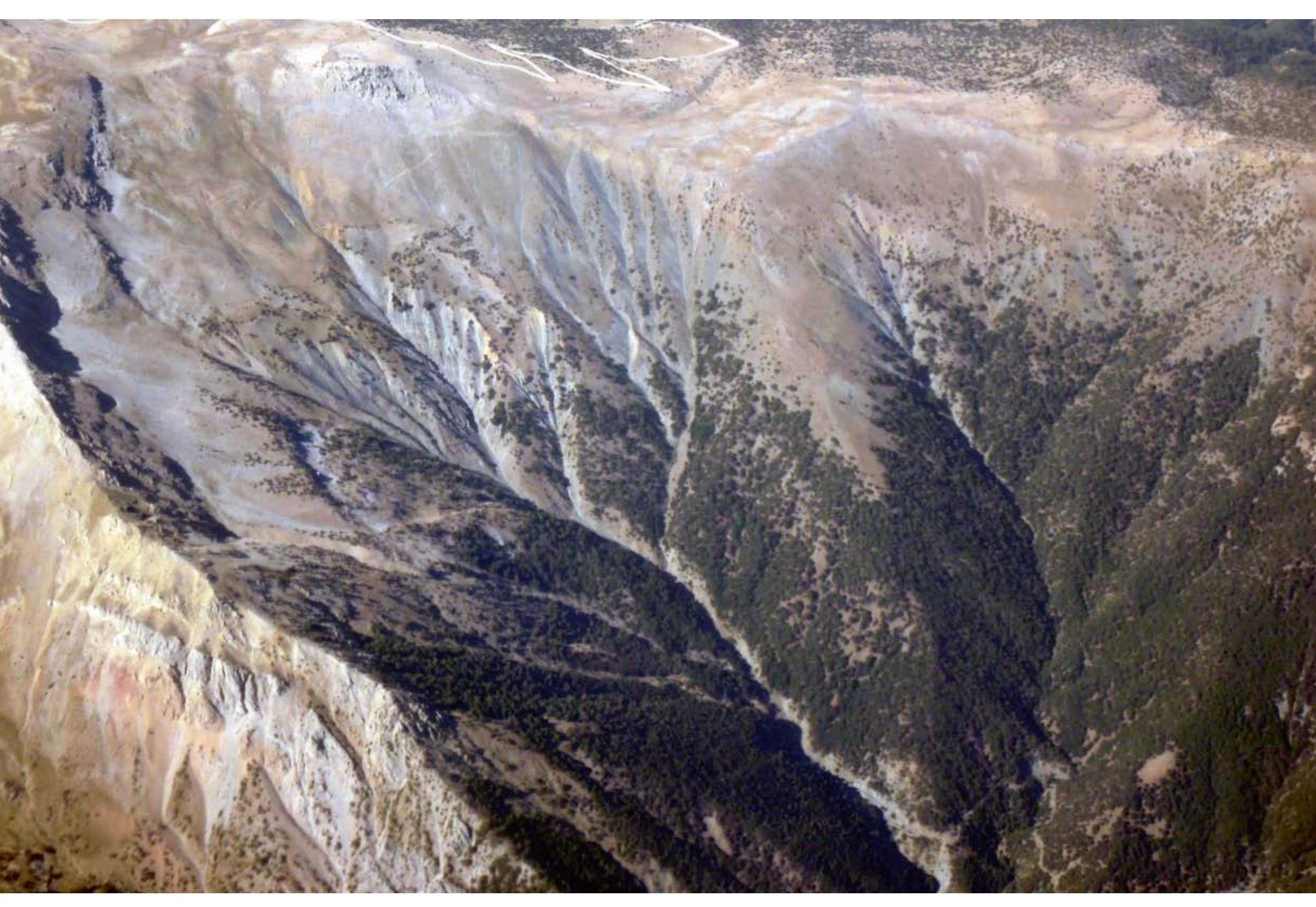
En el caso de un rostro convexo, la situación a la que estamos acostumbrados, la parte observada disminuye su anchura aparente. Nuestro cerebro se ha acostumbrado al fenómeno, por lo que concluye que la cara mira en línea recta y no nos presta atención. En el caso del rostro aplanado, la anchura aparente de la parte examinada permanece prácticamente constante, ya que podemos obviar la paralaje. Como consecuencia, percibiremos que su mirada permanece fija en nosotros: parecerá seguirnos en la medida en que nosotros sigamos la suya.

El caso del rostro cóncavo es el más curioso. A causa de su curvatura invertida, la parte observada parece alargarse al pasar a su lado. La cara da la impresión de desplazarse con mayor rapidez en la dirección de nuestro movimiento a medida que avanzamos. Por tanto, su mirada no solo nos persigue, sino que nos adelanta. Fue justamente este efecto el responsable de que las máscaras huecas de la *Phänomena* desconcertasen a los visitantes. Debido a unas proporciones geométricas inusuales e «invertidas», nuestro cerebro



LA ILUSIÓN EN UN ROSTRO HUECO: Si pasamos junto a una máscara hueca (*negro*), esta parecerá avanzar en nuestra dirección más rápido de lo que cabría esperar. Ello se debe a que nuestro cerebro interpreta que se trata de un rostro convexo: las imágenes virtuales que reproducimos aquí (*rojo y azul*) se obtienen al reflejar la original con respecto a los ejes *L1* y *L2*, perpendiculares a la línea de visión. Mientras que nuestro ángulo de visión cambia en α, las imágenes virtuales giran 2α.

CORTESÍA DEL AUTOR (*máscara de Beethoven*); SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN EL AUTOR (*esquema de la ilusión óptica*)



¿A QUÉ SE DEBE? La situación se complica cuando contemplamos imágenes que no son rostros. Esta imagen de un paisaje montañoso tomada por el autor desde un avión no presenta ninguna dificultad para nuestro sistema de percepción espacial. En cambio, al darle la vuelta, la mayoría percibirá como convexos los relieves cóncavos, y viceversa.

CORTESÍA DEL AUTOR

fracasa a la hora de dar una interpretación física a la imagen, pues parte de la premisa errónea de que se trata de un rostro convexo.

Trucos cognitivos

Las máscaras huecas no son una invención moderna. Las primeras referencias a inversiones de este tipo se remontan al siglo XVII. Los eruditos del siglo XVIII ya intentaron explicar este y otros fenómenos similares en numerosos artículos publicados en las revistas especializadas de su tiempo, como *Annalen der Physik und Chemie*. Hoy, el mismo efecto óptico sigue siendo objeto de estudio. Para sorpresa de los investigadores, algunos sujetos pueden percibir una cabeza hueca como si se tratase de una con relieve, aun cuando su capacidad de percepción espacial se halle totalmente intacta.

En realidad, solo hemos pasado de puntillas por la superficie del enigma. ¿A qué se debe exactamente que podamos ver objetos de manera invertida? Al considerar imágenes que no son rostros, la situación se torna incluso más enrevesada. Contemple la imagen del paisaje montañoso que reproducimos aquí y dele la vuelta. ¿Se convierten las cumbres en valles, y viceversa?

Aunque no le ocurre a todas las personas, la mayoría verá invertirse la imagen. Por desgracia, la física solo nos da una respuesta parcial para entender estas ilusiones; para una comprensión más profunda, deberíamos hurgar en el maletín de trucos de nuestro sistema cognitivo, lleno de aparentes contradicciones. Al parecer, nuestro cerebro podría arreglárselas bastante bien en un mundo lleno de cabezas huecas.

PARA SABER MÁS

Über einige merkwürdige optische Phänomene. L. A. Necker en *Annalen der Phsyik und Chemie*, vol. 27, pág. 502, 1833.

Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes, erster Teil. C. Wheatstone en *Annalen der Phyisik und Chemie*, vol. supl. 1, págs. 1-48, 1842.

The bust of the tyrant: An optical illusion. W. Duitz en *Applied Optics*, vol. 23, págs. 200-2013, 1984.

EN NUESTRO ARCHIVO

Por la cara. Susana Martinez-Conde y Stephen L. Macknik en *MyC*, n.º 56, 2012.

por Agustín Rayo



Agustín Rayo es catedrático de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y profesor de la Universidad de Oslo.

¿Cómo sería el mundo si pudiéramos viajar al pasado?

Agujeros de gusano, indeterminación de las leyes físicas y una posible solución a la paradoja del abuelo

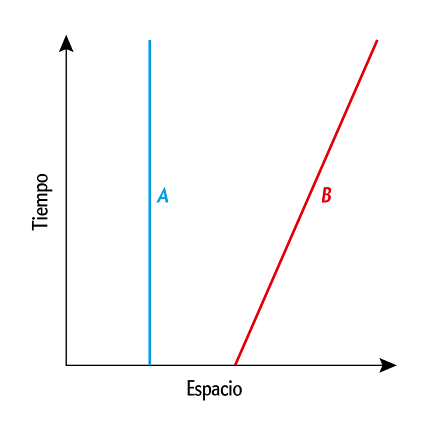
Los viajes al pasado plantean todo tipo de paradojas relacionadas con la causalidad. Tal vez la más célebre sea la «paradoja del abuelo», en la que un individuo viaja hacia atrás en el tiempo y asesina a su abuelo antes de que nazca su padre. ¿Cómo puede perpetrar el crimen alguien que, en tal caso, nunca habría llegado a nacer?

Las propiedades del espacio y el tiempo quedan descritas por la teoría de la relatividad general de Einstein. Sorprendentemente, sin embargo, esta no prohíbe la posibilidad de viajar al pasado. En concreto, sabemos desde hace más de medio siglo que las ecuaciones de Einstein admiten soluciones («universos posibles», si se quiere) en las que un observador puede trazar una curva cerrada no solo en el espacio, sino también en el tiempo, y ello sin exceder jamás la velocidad de la luz.

Las teorías físicas que permiten viajar al pasado exhiben algunas consecuencias muy interesantes. En la columna de este mes me gustaría describir dos de ellas. Sin embargo, en lugar de hablar de la teoría de Einstein, emplearé una simplificación propuesta por los filósofos Frank Arntzenius, de la Universidad de Oxford, y Tim Maudlin, de la de Nueva York. Aunque su teoría no proporciona un modelo realista del universo, sí nos permite entender de manera sencilla algunas de las características que podría mostrar una teoría física que nos permitiese viajar al pasado.

Consideremos un mundo —no relativista— de dos dimensiones: una temporal y una espacial. Sus habitantes son puntos que pueden desplazarse a la derecha o a la izquierda, pero no hacia arriba o hacia abajo, ni tampoco hacia delante o hacia atrás.

Podemos representar el espaciotiempo de nuestro mundo en un plano en el que el eje horizontal corresponde al espacio y el vertical al tiempo. La siguiente figura muestra las trayectorias espaciotemporales de dos individuos, A y B. Mientras que A permanece quieto en la misma posición, B se desplaza hacia la derecha con velocidad constante:



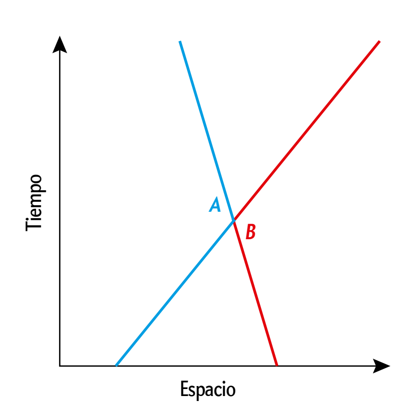
Las leyes dinámicas de nuestro mundo son muy sencillas:

- **Ley 1:** En ausencia de interacciones, los objetos estacionarios permanecerán estacionarios y los que se hallen en movimiento continuarán haciéndolo a velocidad constante.

Esta ley implica que las trayectorias espaciotemporales de los objetos que viajen libremente serán siempre líneas rectas. En particular, un objeto estacionario quedará descrito por una línea vertical (como el individuo A) y uno en movimiento trazará una línea diagonal cuya pendiente vendrá dada por el inverso de su velocidad (como el individuo B).

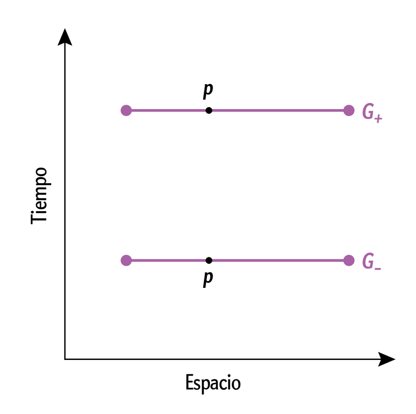
- **Ley 2:** Cuando dos objetos experimentan una colisión, intercambian sus velocidades.

En términos gráficos, esto último significa que las trayectorias de dos cuerpos que chocan forman siempre una equis; por ejemplo:



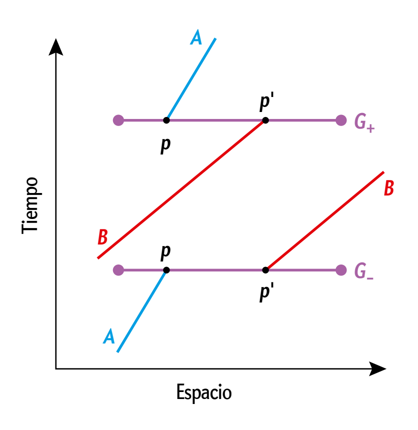
Agujeros de gusano

Imaginemos ahora que nuestro espaciotiempo contiene una estructura que posibilita los viajes en el tiempo. Dicha estructura, a la que denominaremos «agujero de gusano», se encuentra formada por dos segmentos horizontales, G_- y G_+, cuyos puntos están identificados dos a dos. Es decir, cada uno de los puntos de G_- representa el mismo punto del espaciotiempo físico que el punto de G_+ situado justo encima.



Esta identificación tiene dos consecuencias naturales. Primero, cuando un objeto se avecina al segmento G_- desde abajo y lo intersecta en un punto p, continúa su trayectoria desde el punto p de la línea G_+, con la misma velocidad. En otras palabras, el cuerpo entra en el agujero de gusano y salta hacia el futuro.

En segundo lugar, cuando un objeto se avecina a la línea G_+ desde abajo y la intersecta en un punto p', continúa su camino ascendente en el punto p' de la línea G_-, también con idéntica velocidad. Es decir, entra en el agujero de gusano y viaja al pasado. Las dos propiedades que acabamos de enunciar se encuentran ilustradas, respectivamente, en las trayectorias A y B de la siguiente figura:

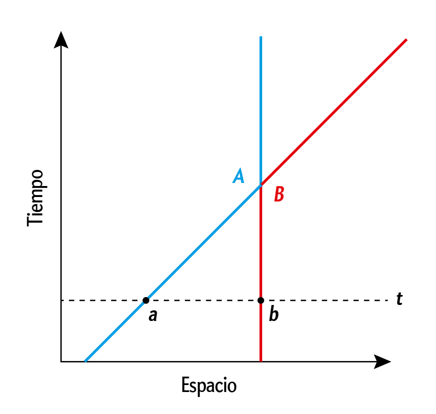


Ya disponemos de todos los elementos que definen nuestra teoría simplificada de los viajes en el tiempo. A continuación, me gustaría mencionar dos sorprendentes consecuencias.

Indeterminación

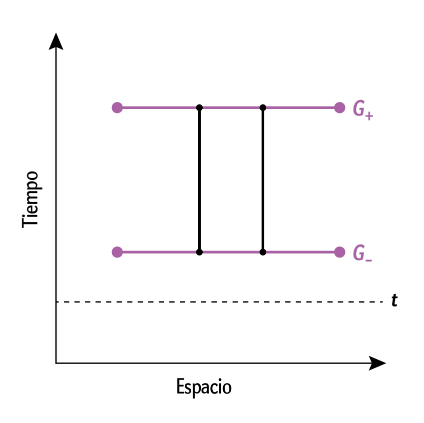
Antes de introducir el agujero de gusano, nuestro mundo era completamente determinista: una especificación de las posiciones y velocidades de todos los objetos en un instante temporal t nos permitía predecir, sin ambigüedad posible, sus posiciones en cualquier instante posterior.

Nuestros diagramas nos proporcionan una manera muy sencilla de ilustrar esta propiedad en un caso particular. Comencemos dibujando una línea horizontal correspondiente al instante t. La posición de cada cuerpo en t vendrá dada por un punto sobre dicha línea. Supongamos que en nuestro universo solo existen dos objetos, A y B. En el instante t, A se encuentra en la posición a con velocidad 1 y B se halla en b con velocidad 0. La evolución de A y B queda descrita de manera unívoca por las siguientes trayectorias espaciotemporales:



No obstante, toda vez que en nuestro espaciotiempo existe un agujero de gusano, nuestro mundo deja de ser determinista. Una manera muy sencilla de verlo consiste en considerar un instante t anterior a la línea G_- y estipular que, en ese momento, no existe en nuestro universo ningún objeto.

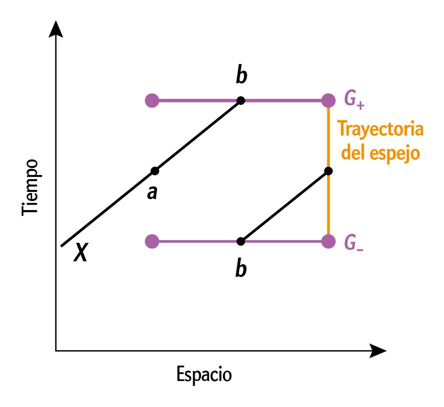
¿Cuántos objetos existirán entre G_- y G_+? Nuestras leyes dinámicas (las mismas que antes implicaban una evolución determinista) son ahora compatibles con que la respuesta sea 0, pero también 1, 2 o, de hecho, cualquier otro número natural, incluso uno infinito. La siguiente figura ilustra el caso para n = 2:



Solución de paradojas

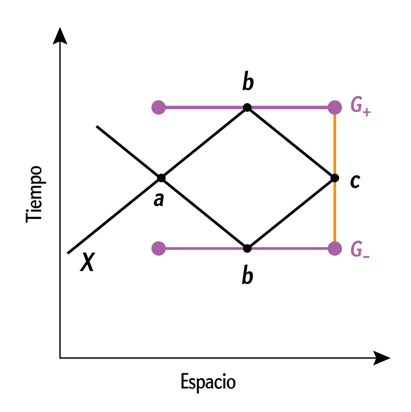
Supongamos ahora que nuestro mundo contiene un «espejo»: un objeto estacionario (es decir, descrito por una trayectoria espaciotemporal vertical) en el que todos los cuerpos rebotan, invirtiendo su velocidad. Semejante espejo nos permitirá concebir una situación aparentemente paradójica.

Imaginemos un objeto X que se aproxima al agujero de gusano desde la izquierda, según se indica en la siguiente figura:



X pasa por a e intersecta la línea G_+ en el punto b. Tras viajar al pasado a través del agujero de gusano, continúa su trayectoria desde G_- y choca con el espejo en el punto c.

¿Cómo continúa su trayectoria espaciotemporal? Las leyes dinámicas de nuestro mundo implican la siguiente evolución:



Vemos que, en el punto a, tiene lugar una colisión que impide que X entre en el agujero de gusano. Pero ¿contra qué colisiona X? Parece que lo hace contra una versión futura de sí mismo: una que ya entró en el agujero de gusano, viajó al pasado y rebotó en el espejo.

Así descrita, sin embargo, la situación resulta paradójica, ya que no permite contestar a la pregunta de si X consigue entrar o no en el agujero de gusano. Si la respuesta es afirmativa, el objeto genera un obstáculo que impide su propia entrada. Y, si es negativa, no hay nada que le impida penetrar en el agujero de gusano, lo que nos lleva de nuevo a una contradicción. Dicha situación resulta similar a la que se da en la paradoja del abuelo.

Por fortuna, esta no es la única manera de interpretar nuestro diagrama espaciotemporal. Otra posibilidad consiste en suponer que hay tres objetos diferentes, *X*, *Y* y *Z*, cada uno con su propia trayectoria:

- *X*, el objeto original, se desplaza de izquierda a derecha hasta la colisión en el punto *a*. Tras el choque, su velocidad se invierte y continúa hacia la izquierda.
- La colisión no tiene lugar contra una versión futura de *X*, sino contra otro cuerpo, *Y*. Este último parte del punto *b* en el segmento G_- y se desplaza hacia la izquierda en dirección a *a*, donde se desvía y continúa hasta el punto *b* del segmento G_+.
- Al llegar a G_+, el objeto *Y* colisiona con un tercero, *Z*. Este parte del punto *b* de G_-, avanza hacia la derecha hasta chocar contra el espejo, rebota y comienza a avanzar hacia G_+.

Aunque esta última interpretación del diagrama no resulta paradójica, implica que en la región situada entre G_- y G_+ existen objetos que no provienen de fuera de dicha zona. Vale la pena notar, sin embargo, que esto no es más que un caso particular de la indeterminación que dedujimos en el apartado anterior. Como vimos, la existencia de un agujero de gusano implica que no hay ninguna manera de predecir qué existirá en su interior a partir de lo que ocurre fuera de él.

El razonamiento anterior sugiere que, si fuéramos capaces de construir una máquina del tiempo, tendríamos que tener cuidado, pues podría resultar imposible predecir qué ocurrirá en la región espaciotemporal afectada por nuestra máquina. Como señalan Arntzenius y Maudlin, alguien que se dispone a viajar al pasado para asesinar a su abuelo debería estar preparado para que su entrada en la máquina del tiempo se vea impedida por algún objeto inusual, uno cuya existencia quede confinada a la región espaciotemporal sobre la que actúa la máquina.

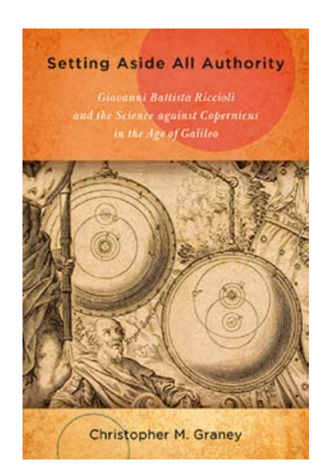
PARA SABER MÁS

Frank Arntzenius y Tim Maudlin desarrollan el modelo expuesto en esta columna en el artículo «Time travel and modern physics» de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy*: **plato.stanford.edu/archives/win2013/entries/time-travel-phys**

EN NUESTRO ARCHIVO

Viajes a través del tiempo. Agustín Rayo en *IyC*, octubre de 2009.

Una breve historia de los viajes en el tiempo. Tim Folger en *IyC*, noviembre de 2015 (número monográfico con ocasión del primer centenario de la teoría general de la relatividad).



SETTING ASIDE ALL AUTHORITY
GIOVANNI BATTISTA RICCIOLI AND THE SCIENCE AGAINST COPERNICUS IN THE AGE OF GALILEO

Christopher M. Graney. University of Notre Dame Press, Notre Dame; Indiana, 2015.

Copernicana

El debate de la ciencia contra la ciencia

El libro es una exposición rigurosa y académica de los argumentos científicos esgrimidos en el siglo XVII contra el sistema copernicano. Christopher M. Graney desvela el error de una opinión muy generalizada, según la cual los contrarios a las ideas heliocéntricas de Copérnico y Galileo se movían por creencias religiosas, en el marco de una tradición arcaica que retrocedía ante el avance de los descubrimientos alcanzados con el telescopio. Demuestra Graney que la ciencia, y no la religión, desempeñó un papel predominante en la oposición al sistema copernicano [*véase* «El caso contra Copérnico», por D. Danielson y C. M. Graney; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2014].

En *De revolutionibus*, de 1543, Copérnico había propuesto una explicación de los movimientos complejos de las cinco estrellas errantes, los planetas entonces conocidos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. No permanecían en una constelación, sino que cambiaban en el zodíaco, formando bucles, siguiendo trayectorias complejas y su magnitud variaba a medida que se acercaban o alejaban de la Tierra. Copérnico afirmaba que todo se entendía mejor si esos cuerpos y la Tierra giraban en torno al Sol, y no si esos cuerpos y el Sol giraban en torno a la Tierra, de acuerdo con el sistema de Ptolomeo. Pero Copérnico propuso su modelo siglo y medio antes de Newton, cuando la física aceptada era la aristotélica.

Los anticopernicanos lograron articular un razonamiento científico vigoroso contra el sistema heliocéntrico, al menos hasta mediados del siglo XVII, varios decenios después de la introducción del telescopio. Pero ¿cómo atender a las pruebas presentadas por el telescopio y no aceptar el sistema copernicano? Hacia 1578, Tycho Brahe llegó al convencimiento de que los planetas inferiores (Venus, Mercurio y la Luna) se movían alrededor del Sol; hacia 1584 extendió ese movimiento circunsolar a los planetas superiores (Saturno, Júpiter y Marte). Desarrollada entre 1583 y 1588, expuso su cosmología planetaria en un capítulo, el octavo, de su principal obra astronómica, *De mundi aetheri recentioribus phaenomenis*, publicada en 1588. Los restantes nueve están dedicados a las observaciones de Brahe sobre el tamaño, composición y comportamiento de los cometas (en particular, el de 1577).

A grandes rasgos, el sistema de Tycho era un modelo geocéntrico, pues reservaba para la Tierra el centro del universo. En torno al Sol giraban Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Encima, y rodeándolo todo, había una esfera de estrellas. El Sol, la Luna y las estrellas giraban en torno a la Tierra. De ese modo, creía combinar las ventajas matemáticas del sistema copernicano con los beneficios filosóficos y físicos del sistema ptolemaico; los movimientos de los planetas y del Sol con relación a la Tierra equivaldrían, matemáticamente hablando, a los movimientos del sistema heliocéntrico de Copérnico. El sistema de Tycho se ajustaba mejor que el sistema copernicano a los datos entonces disponibles.

Con respecto a la física, Tycho sostenía que la Tierra era demasiado pesada para hallarse en movimiento continuo. De acuerdo con la doctrina aceptada en su tiempo, los cielos, cuyos movimientos y ciclos eran continuos y sin final, estaban hechos de éter o de quintaesencia; esa sustancia, ausente en la Tierra, era ligera, fuerte e inmutable. Su estado natural era el movimiento circular; por el contrario, el de la Tierra y de los objetos que contenía, pesados, era de reposo.

Además, si la Tierra, como afirmaba Copérnico, giraba anualmente en torno al Sol, y si ni el Sol ni las estrellas se movían, entonces el movimiento anual de la Tierra debía revelarse en las estrellas, un fenómeno conocido por paralaje anual. Si la Tierra orbitase alrededor del Sol en traslación anual habría una paralaje estelar sobre un período de seis meses, durante los cuales la orientación angular de una estrella determinada cambiaría gracias a la posición cambiante de la Tierra. (Esa paralaje existe, pero es tan pequeña que no pudo detectarse hasta 1838, cuando Friedrich Bessel descubrió la paralaje de 0,314 segundos de arco de la estrella 61 Cygni.) A medida que el movimiento orbital acerca la Tierra a determinadas estrellas y la aleja de otras, las estrellas en cuestión debían crecer y decrecer en magnitud. Sus posiciones relativas deberían cambiar también, conforme la Tierra se aproximara y se distanciara: dos estrellas vecinas deberían aparecer algo más separadas cuando la Tierra se hallara cerca que cuando se encontrara lejos. Para Copérnico, las variaciones de brillo y los movimientos retrógrados de los planetas eran manifestaciones de esos efectos.

Tycho reclamaba que el movimiento de la Tierra se detectara en experimentos físicos. En intercambio epistolar con el copernicano alemán Christoph Rothmann, Tycho trae a colación la caída de una bola de plomo arrojada desde una torre y los disparos de dos cañones lanzando balas idénticas hacia el este y el oeste. Su explicación de la física subyacente es una mezcla de Aristóteles y de la teoría del «ímpetu»: una bala de un cañón tiene un movimiento natural descendente debido a su propio peso, pero el cañón puede conferirle otro movimiento, violento (no natural), que resulta del ímpetu aportado por la pólvora explosiva.

Mediado el siglo XVII, la teoría geoheliocéntrica, razonada por Giovanni Battista Riccioli (1598-1671), tenía a la ciencia de su lado. Natural de Ferrara y profesor en Parma y Bolonia, Riccioli desarrolló y cribó los fundamentos de los distintos sistemas astronómicos de su tiempo en *Almagestum novum* (1651), que constaba de dos volúmenes y más de 1500 páginas; era un texto denso, acompañado de diagramas. Le siguió *Astronomia reformata* (1665), más breve. Aunque considera el sistema de Copérnico «el más bello, el más simple y el mejor imaginado», no puede aceptarlo y se decide por el de Tycho Brahe.

El *Nuevo Almagesto* era la astronomía. Toda la información disponible sobre la materia podía encontrarse en sus páginas. Había capítulos dedicados

al movimiento de los cuerpos celestes, análisis geométricos y representaciones de las apariciones de Júpiter, Venus y otros planetas que se observaban en los mejores telescopios. Contenía informes y tablas de datos obtenidos en diferentes tipos de experimentos (caída de graves en el aire y en el agua). Abundaban las tablas astronómicas. En el mapa de la Luna se detallaban los accidentes del relieve y sus nombres. Distinguimos un cráter denominado «Copernicus», otro llamado «Galileo», una amplia superficie lisa, o «Mar de la Tranquilidad». Cuanto en el libro no apareciera no valía la pena ser conocido. El primer astrónomo real inglés, John Flamsteed, utilizaba esa obra como libro de texto para sus clases públicas en el Colegio Gresham en 1665.

Precedía al *Nuevo Almagesto* un frontispicio impresionante que representaba el conocimiento astronómico de su tiempo. Se ilustra a Júpiter con cuatro lunas, según mostrara Galileo en *Sidereus nuncius*, de 1610. Júpiter aparecía con cuatro bandas, un descubrimiento contemporáneo. Mostraba a Venus en fase creciente, de acuerdo con lo visto por Galileo a través del telescopio. Mercurio en fase creciente también, otro descubrimiento reciente. Sin omitir una Luna salpicada de cráteres, Marte, Saturno, etcétera. El *Nuevo Almagesto* recogía todos los descubrimientos clave que se habían realizado con el telescopio desde que Galileo miró por vez primera a los cielos en 1609.

Con todo, el rasgo principal del frontispicio es una suerte de balanza, sostenida por Urania, musa griega de la astronomía, mientras que Argos, el mitológico gigante de cien ojos, agarra con firmeza un telescopio. A la izquierda del frontispicio se ilustra el sistema heliocéntrico de Copérnico: el Sol aparece en el centro y los planetas en órbita a su alrededor, con la Luna en órbita alrededor de la Tierra. Enfrente no aparece el sistema geocéntrico de Ptolomeo, autor del *Almagesto* original, y Aristóteles, en el que la Tierra ocupa el centro de todo y todo circula en torno a la Tierra. Para el sistema geocéntrico ptolemaico se le reserva el extremo inferior derecho del frontispicio.

El sistema que aparece frente al sistema heliocéntrico es un sistema geocéntrico. La Tierra está en el centro; en torno a ella giran el Sol y la Luna. Pero no es un sistema puramente geocéntrico. Los planetas circulan en torno al Sol. Contiene, pues, elementos heliocéntricos. Riccioli defiende que ese geocentrismo híbrido es superior al heliocentrismo copernicano. Por fin, en el frontispicio la observación telescópica se acompaña de tres leyendas (tres versículos de los Salmos) alusivas al número, medida y peso. La observación del astrónomo se complementa con el análisis físico de la cuantificación, medición y peso.

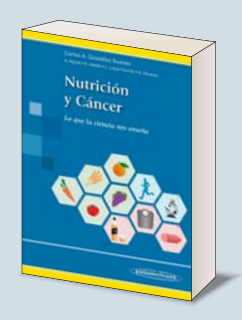
Para Riccioli, Copérnico estaba equivocado. Además del frontispicio, una parte extensa del *Nuevo Almagesto* consta de un análisis del debate sobre los sistemas del mundo; una discusión ceñida al dominio exclusivo de la razón, sin apelar a tesis religiosas. De ahí el título del libro de Graney, *Setting aside all authority*. Escribe Riccioli: «Considerando solo la razón y los argumentos intrínsecos, y dejando de lado toda autoridad, la hipótesis que implica la inmovilidad o quietud de la Tierra debe declararse verdadera. Y la hipótesis que concibe una Tierra en movimiento (diurno o diurno y anual) debe reputarse absolutamente falsa y en desacuerdo con las demostraciones físicas y físico-matemáticas».

En su análisis del geocentrismo híbrido frente al heliocentrismo, Riccioli revisaba en *Nuevo Almagesto* 126 argumentos propuestos por unos y otros contendientes. Se trata del análisis más extenso, penetrante y autorizado que haya realizado cualquier autor de los siglos XVI y XVII. Cuarenta y nueve de los argumentos expuestos favorecían el heliocentrismo; setenta y siete, el geocentrismo. Para Riccioli no se trataba de una cuestión de cifras. La balanza que sostenía Urania en sus brazos no ponderaba el número.

La inmensa mayoría de los argumentos, de un signo u otro, no resultaban convincentes. Los había manifiestamente erróneos. Otros, pese a su razonabilidad, resultaban insatisfactorios. Considérese, por ejemplo, el argumento número 22 del heliocentrismo: «El Sol ocupa el centro del sistema planetario; queda telescópicamente demostrado en el caso de la observación de las fases de Mercurio y Venus y conjeturado en los otros. Por consiguiente, debe ser el centro del universo». Parece un argumento razonable, resalta Riccioli; sin embargo, el geocentrismo híbrido ofrece una respuesta válida, más sólida: el Sol no es ni el centro de la órbita de la Luna, ni el centro de la caída de los cuerpos celestes, ni el centro de las estrellas.

Selecciona una serie exigua de argumentos, que él supone convincentes, en pro de la tesis anticopernicana, que no pueden ser objetados por los heliocentris-

NOVEDADES



NUTRICIÓN Y CÁNCER
LO QUE LA CIENCIA NOS ENSEÑA
Carlos A. González Svatetz
y otros autores
Editorial Médica Panamericana, 2016
ISBN 978-84-9835-925-1
206 págs. (25,65 €)



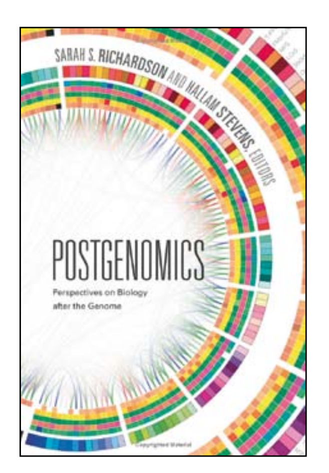
RAMON MARGALEF, ECÓLOGO DE LA BIOSFERA
UNA BIOGRAFÍA CIENTÍFICA
Narcís Prat, Joandomènec Ros
y Francesc Peters
Publicacions i Edicions de la
Universitat de Barcelona, 2015
ISBN 978-84-475-3747-1
188 págs. (36 €)



LA CIÈNCIA EN LA LITERATURA
UN VIATGE PER LA HISTÒRIA
DE LA CIÈNCIA VISTA PER
ESCRIPTORS DE TOTS ELS TEMPS
Xavier Duran
Publicacions i Edicions de la
Universitat de Barcelona, 2015
ISBN 978-84-475-4233-8
364 págs. (25 €)

tas. Uno de ellos se refiere a la rotación de la Tierra y su detección. Para Riccioli, la rotación terrestre debía producir ciertos fenómenos observables que no se habían observado. Por consiguiente, la Tierra no giraba. Sin salirse nunca del ámbito de la razón, recupera un segundo argumento anticopernicano, de gran alcance en su tiempo: el tamaño de las estrellas. Para Riccioli, las observaciones telescópicas de las estrellas mostraban que, de ser correcta la hipótesis copernicana, las estrellas deberían ser enormes. Según afirmaba, una sola estrella del sistema copernicano podría ser mayor que el universo entero del sistema geocéntrico. Por el contrario, en el sistema geocéntrico híbrido, las estrellas alcanzaban su magnitud justa. La objeción de la magnitud de las estrellas puede encontrarse en los astrónomos contemporáneos: Johann Georg Locher, Francesco Ingoli y Philips Lansbergen. Locher e Ingoli fueron anticopernicanos cuyas ideas criticó Galileo. Lansbergen, en cambio, era un copernicano prominente que adaptó la objeción del tamaño de las estrellas para apuntalar la superioridad del sistema heliocéntrico. Paradójicamente, Locher e Ingoli apelaban a razones exclusivamente científicas, en tanto que Lansbergen se refugiaba en motivos religiosos.

—Luis Alonso



POSTGENOMICS
PERSPECTIVES ON BIOLOGY AFTER THE GENOME
Dirigido por Sarah S. Richardson y Hallam Stevens.
Duke University Press; Durham, 2015.

Postgenómica

La genética subsiguiente al Proyecto Genoma Humano

En 1999, Francis Collins, mirando el camino recorrido desde el lanzamiento en 1990 del Proyecto Genoma Humano (entonces HUGO, de Human Genome Organisation), auguraba para la biología el inicio de una etapa nueva, definitiva, con el arranque de un programa que habría de identificar hasta el último detalle del conjunto entero de instrucciones genéticas del ser humano, constituido por 46 cromosomas compuestos de unos 3000 millones de pares de bases en una doble hélice de ADN. Pasados 15 años, la historia ha resultado ser muy otra. Desde el punto de vista temporal, «postgenómica» corresponde al período subsiguiente a la secuenciación del genoma humano. Desde el punto de vista técnico, reúne las ciencias biológicas y médicas que utilizan la información genómica como un elemento fundamental de su praxis investigadora.

Para la escuela de Thomas H. Morgan, a la genética cumplía el estudio de la transmisión de determinados factores o genes. Aun cuando no pudiera afirmarse en qué consistía un gen, se suponía que era una unidad asociada directamente con un carácter y, al propio tiempo, una unidad que podía vincularse a la aparición de una diferencia (mutación). La identificación entre diferencia fenotípica y gen subyacente requería un proceso de cambio en una entidad subyacente (gen hipotético), inferido a partir de la aparición de la diferencia en el carácter (color de los ojos).

Wilhelm Johannsen, que acuñó el término *gen*, se planteaba ya en 1923 si la doctrina mendeliana no sería más que el establecimiento de irregularidades, alteraciones o patologías cromosómicas, de enorme importancia práctica pero carentes de valor para comprender la constitución normal de los biotipos. Lo que hacía interesantes a los genes era su presumible capacidad de conformar los caracteres del organismo. El proceso en cuya virtud ejercían su poder en el desarrollo de caracteres o rasgos se denominaba acción génica, y se esperaba que el estudio de los genes informara de la acción génica. Por entonces, al conjunto entero de cromosomas empezó a llamársele genoma.

El descubrimiento, en 1953, de la estructura en doble hélice del ADN llevó al dogma central de la biología (el ADN se transcribe en ARN, que se traduce en proteína), la revelación del código, la emergencia de la ingeniería genética y el desciframiento del mecanismo de las enfermedades mendelianas. Prendió la idea de un crecimiento exponencial en nuestra capacidad de medir e interpretar la información del ADN. La hipótesis de Beadle y Tatum (un gen, una enzima) pareció aportar al menos una respuesta parcial a la función del gen.

Esa tesis puramente estructural pecaba de excesiva simpleza. Dejaba fuera toda la cuestión de la regulación génica, qué dicta cuándo, dónde y cuánta proteína ha de sintetizarse. Jacques Monod y François Jacob enmendaron esa omisión de forma brillante, sin cuartear el esquema básico. Añadieron una nueva clase de elementos genéticos, los genes reguladores, que controlan la tasa de síntesis de proteína, cuya estructura está gobernada por otros genes. Tras la incorporación explícita de la regulación, el genoma podía seguir considerándose una colección de genes, salvo que ahora unos genes eran estructurales (responsables de la síntesis de proteínas que ejercen funciones estructurales en la célula), en tanto que otros operaban la regulación de genes estructurales.

Desde 1970, especialmente desde que el foco de atención de la genética molecular se desplazó hacia el estudio de los organismos eucariotas y el estudio de la regulación adquirió creciente centralidad, la relación entre genes y genética fue adquiriendo complejidad. Contra la equivalencia entre genética y genes laboraron también varios descubrimientos sobre secuencias de ADN del genoma eucariota sin función codificadora, «no génicas», por tanto. Quizá los hallazgos más interesantes a este respecto fueran las grandes cantidades de ADN repetitivo en 1968; más tarde, de los transposones, la relación variable entre la cantidad de ADN de un organismo y su complejidad, y, por último, la partición génica, es decir, secuencias codificadoras de proteína interrumpidas por intrones no codificadores. A ese ADN extra Susumo Ohno lo llamó en 1972 «basura».

Hasta comienzos de los noventa persistió el convencimiento de que en el ge-

noma eucariota había grandes cantidades de ADN sin función codificadora, que no contribuía, por tanto, al fenotipo y, en consecuencia, podía ignorarse. A todos los fines prácticos, los genomas (o, al menos, las partes interesantes de los genomas) podían seguir considerándose colecciones de genes.

La introducción y difusión del término *postgenómica* se remontan a una serie de reuniones que antecedieron a la planificación del Proyecto Genoma Humano. Tituladas «Conferencias sobre después del genoma», aventuraban que la era postgenómica abarcaría el estudio de sistemas interdependientes, de interacciones entre genes y entorno y de modelos complejos de las vías biológicas, que demandarían refinadas capacidades informáticas y computacionales. El proyecto habría de alumbrar los secretos de la salud humana, la enfermedad y la identidad.

Cierto es que no faltaron voces críticas. Cuando se propuso el Proyecto Genoma Humano, Robert Weinberg cuestionó su utilidad aduciendo que el 95 por ciento del genoma contenía bloques de secuencias ayunos de información biológica. Pero a mediados de los noventa se puso ya de manifiesto la endeblez de la afirmación de que el ADN no codificador carecía de función. Al doblar el milenio, eran ya muy pocos —ni siquiera Weinberg— los que asociaban ADN no codificador con ADN basura.

En las celebraciones que rodearon la conclusión del Proyecto Genoma Humano muy pocos sospecharon lo que vendría después. Confiábase en que sería una época resolutiva de trabajo rutinario. La secuenciación exhaustiva prometía un futuro en el que los caracteres se vincularían a diferencias comunes en el genoma. James Watson, su primer director, sentenció que, antaño, muchos creyeron que nuestro futuro estaba escrito en las estrellas; ahora sabremos que está en los genes.

Sorprendió de entrada cuán pocos genes componían el genoma humano; muy parca también era la fracción del genoma dedicada a secuencias codificadoras de proteínas. En un artículo de revisión publicado en 2004 se recogía que los eucariotas simples portaban entre un 25 y un 50 por ciento de ADN no codificador; hongos, plantas y animales ofrecían cifras superiores al 50 por ciento, elevándose al 98,5 por ciento en el caso del hombre. Desde 2005, los biólogos iniciaron la cartografía génica de miles de individuos, en busca de una correlación entre polimorfismos nucleotídicos y rasgos genotípicos. Se hizo amplio uso de la técnica de contrastación del significado y función del genoma, denominada estudio de la asociación del genoma (GWAS, de *genome-wide association study*). Para abordar la obesidad, por ejemplo, GWAS muestreó a miles de individuos con exceso de peso y a miles de individuos normales. Si una mutación particular se presentaba en el *locus x* en una fracción elevada de personas obesas y en una fracción irrelevante de personas no obesas, se infería que el sitio *x* determinaba la obesidad. Ese análisis se repitió en millones de regiones del genoma, construyendo un cuadro general de *loci* asociados con rasgos particulares.

Creado en 2003, el consorcio de investigación ENCODE debía identificar todos los elementos funcionales del genoma humano. Se trataba de uno de los empeños más ambiciosos para comprender los 3000 millones de letras del genoma humano. Los primeros resultados de esa empresa (basados en el 1 por ciento del genoma) aparecieron en 2007. Quedó claramente establecido que la mayor parte del ADN se transcribía (incluidas las regiones no codificadoras), que las secuencias reguladoras podían solaparse con regiones codificadoras de proteínas y que las secuencias no codificadoras tendían a persistir en el curso de la evolución. Se observó, además, que el ADN transcrito en ARN no codificador intervenía en muchas formas y niveles de regulación genética.

En 2010 se habían publicado unos 700 GWAS de unas 400 enfermedades y caracteres. Conforme se multiplicaban los estudios, se fueron definiendo dos tendencias. A tenor de la primera, muchos rasgos (incluidos los que los biólogos hubieran reputado simples) se hallaban asociados a cientos, miles incluso, de sitios del genoma; en cierto trabajo, por ejemplo, se asociaron 180 sitios con la altura humana. A tenor de la segunda tendencia, no cabía hablar de efecto aditivo de esas ubicaciones; así, los estudios de gemelos monocigóticos sugerían que la variación del 80 al 90 por ciento en la altura era heredable. Sin embargo, sirviéndose del GWAS para medir la contribución de cada sitio a la variabilidad global de altura, resultaba que era muy pequeña: la suma de todas las contribuciones de los cientos de sitios solo daba cuenta de un 13 por ciento de la variabilidad global.

El proyecto ENCODE anunció sus resultados en 2012. Revelaba que el 80 por ciento del ADN humano cumplía alguna función. Muchos celebraron ese hito, proclamando la muerte del ADN basura y predijeron la urgencia en rescribir los manuales. Pero no faltaron biólogos que recibieran con reticencia esa cifra del 80 por ciento. Tildaron a ENCODE de emplear con precipitación y frivolidad el término «función»; separaba, aducían los críticos, el análisis genómico de su contexto evolutivo e ignoraba un siglo de teoría de genética de poblaciones, amén de emplear métodos que sobreestimaban la funcionalidad. El grueso de esa objeción se apoyaba en que el análisis de genómica comparada había descubierto de una manera consistente que no superaba el 10 por ciento del genoma humano sometido a selección activa. ¿Cómo podría, pues, ser funcional entonces el 80 por ciento del mismo? Los críticos denunciaban que el proyecto ENCODE había escogido una definición de función que ignoraba por entero la evolución.

Aparecían nuevos horizontes. Una mujer embarazada es un mosaico genómico (las células fetales pueden permanecer en su cuerpo largo tiempo después del alumbramiento); además, el uso creciente de la medicina de trasplante, incluida la transfusión sanguínea, crea un mosaicismo genómico artificial. Un organismo humano es un sistema simbiótico que contiene multitud de células microbianas (bacterias, arqueas y hongos) sin las cuales el todo quedaría disfuncional y, a la postre, no viable.

La genética de la conducta epitomiza la controversia en biología. El empeño puesto en el conocimiento de la base genética de asuntos culturalmente sensibles como la inteligencia, la criminalidad, la sexualidad, la salud mental y la personalidad han planteado siempre objeciones de determinismo genético.

Tras la terminación del Proyecto Genoma Humano emergió la epigenética como foco de inversión institucional y como nueva área principal de investigación. La epigenética es el estudio de mecanismos moleculares que comportan un cambio persistente o heredable de la función génica sin cambiar la secuencia de genes. Uno de esos mecanismos es la metilación de ADN, el proceso por el que un grupo metilo (CH_3) se agrega a la estructura física de la molécula de ADN. La presencia de metilación en un *locus* génico particular impide la expresión génica a través de la obstrucción de la transcriptasa de ADN y otras proteínas enlazantes con el ADN.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

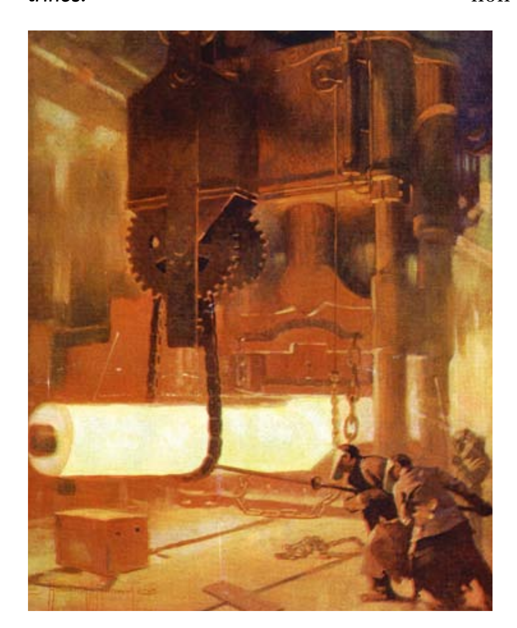


Febrero 1966

Detección de neutrinos

«A más de tres mil metros bajo tierra, en una mina de oro de Johannesburgo, se está llevando a cabo un experimento cuyo propósito es estudiar los neutrinos hiperenergéticos producidos en las colisiones de los rayos X cósmicos con la atmósfera terrestre. El 27 de octubre de 1964, a los 13 meses de haberse elegido el emplazamiento surafricano, nuestros instrumentos registraron la primera observación a gran profundidad terrestre de un muon "hermano" de rayos cósmicos. Después, el 23 de febrero de 1965, los detectores captaron un muon que había viajado horizontalmente: ¡se había observado el primer neutrino hiperenergético natural! Desde febrero pasado, hemos identificado en nuestros instrumentos unos 80 muones hermanos y 10 "hijos". Estas estadísticas están empezando a rendir las primeras estimaciones de la probabilidad de interacción de los neutrinos hiperenergéticos. —Frederick Reines y J.P.F. Sellschop»

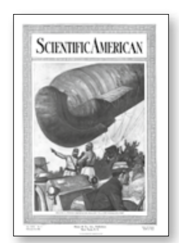
Reines compartió el Nobel de física de 1995 por sus trabajos sobre la detección de neutrinos.



OPERARIOS manipulando un cañón naval de gran calibre en una forja pesada durante su fabricación, en 1916. Necesitadas con urgencia en aquellos años, tales armas requerían una ingente capacidad industrial.

Jet lag

«Una serie de pruebas efectuadas por la Agencia Federal de Aviación de EE.UU. han corroborado la habitual queja de los viajeros en avión acerca de que un paso rápido a través de varios husos horarios perturba las funciones corporales e incluso las mentales. Según Sheldon Freud, psicólogo de la Fuerza Aérea que ha trabajado en esas pruebas, las reacciones de los pasajeros impusieron la necesidad de hacerlas también con las tripulaciones. "Esos hombres son responsables de las vidas de millones de pasajeros cada año", dijo. Freud formuló una pregunta sobre los vuelos supersónicos, que serán al menos dos veces más rápidos que los de los reactores actuales: "¿Tendremos que reposar el doble de tiempo después? ¿Vale la pena apresurarse tanto para llegar a ese punto?"»



Febrero 1916

La carrera de armamentos navales

«El *California*, el *Mississippi* y el *Idaho* van a ser artillados con un nuevo tipo de cañón de 14 pulgadas, que desplegará una potencia de fuego considerablemente superior a la del cañón de 45 calibres. La nueva pieza tiene un ánima seis pies más larga que la del cañón de 14 pulgadas y 45 calibres. Afirma el contraalmirante [Josef] Strauss, Jefe de Armamento y Material, que esos nuevos cañones son capaces de perforar los blindajes laterales más gruesos por impacto oblicuo desde el máximo alcance de combate. Es gratificante saber que el nuevo cañón de 16 pulgadas y 45 calibres, construido en la Fábrica de Cañones de Washington, ha satisfecho las mayores expectativas (*véase la ilustración*).»

Comunicaciones benditas

«Según informa el corresponsal en Roma de una destacada agencia de noticias, círculos vaticanos anuncian que el papa Benedicto XV se dispone a bendecir oficialmente la telegrafía inalámbrica, recuperando así la antigua costumbre de la Iglesia de bendecir las invenciones que suponen un gran beneficio para la humanidad.»



Febrero 1866

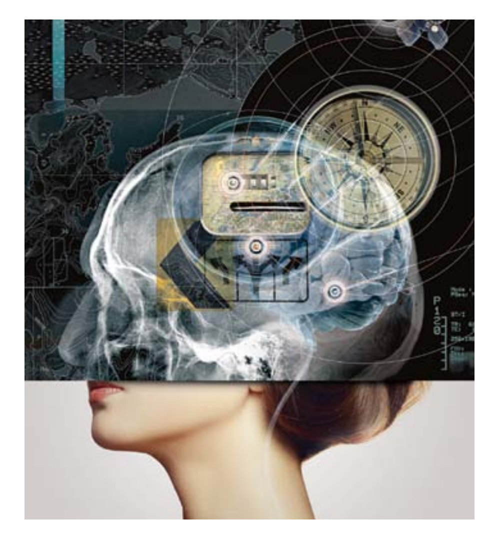
Alcantarillado urbano

«Los puentes del Támesis no son apenas nada al lado de las redes de desagüe metropolitanas construidas durante los años más recientes. En Londres hay más de 130 kilómetros de cloacas principales. La potencia nominal de bombeo alcanza los 2380 CV, y si los motores trabajaran a pleno rendimiento día y noche, consumirían 44.000 toneladas de carbón al año. La captación diaria de aguas residuales por las redes en la margen norte del río supera los 280.000 metros cúbicos y los 110.000 en la margen sur; pero las redes se han construido previendo que esas cifras aumenten. En las excavaciones del alcantarillado se encontró un gran número de restos de animales, monedas antiguas y otros objetos curiosos, la mayoría de los cuales se han depositado en el Museo Británico.»

La superioridad del sistema métrico

«El último boletín mensual del Departamento de Agricultura de EE.UU. publica un artículo en extremo inteligente acerca del sistema francés de pesos y medidas. No nos cabe duda de que si cada miembro del Congreso dedicara un mínimo esfuerzo a entender este sistema, el mismo sería adoptado inmediatamente en una votación casi unánime. Un niño lo dominaría por completo en menos tiempo del que necesita para aprenderse de memoria la tabla de pesos *avoirdupois*. Hagamos que el Congreso apruebe una ley que declare el sistema (métrico) francés de pesos y medidas como sistema legal de EE.UU. desde el uno de enero de 1867. Antes de que acabe el año, se habrá generalizado el asombro ante el hecho de que hayamos estado tanto tiempo soportando los enormes esfuerzos e inconvenientes que encierra nuestro complicado e incongruente sistema tradicional.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIV, N.º 6, 5 DE FEBRERO DE 1916

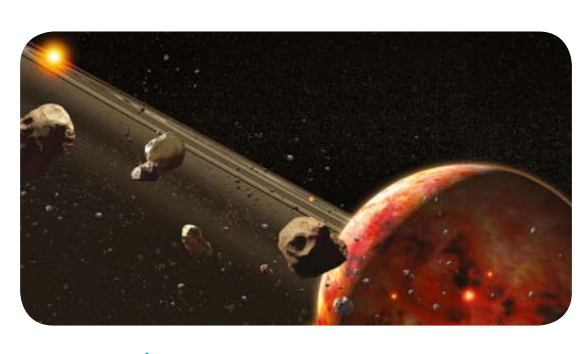


NEUROCIENCIA

El GPS del cerebro

May-Britt Moser y Edvard I. Moser

Los investigadores han comenzado a desentrañar el complejo sistema que emplea nuestro cerebro para orientarse.



ASTRONOMÍA

Los anillos de un supersaturno

Matthew Kenworthy

Un descomunal sistema de anillos y probablemente una luna rodean a un planeta situado a 400 años luz.



MATEMÁTICAS

Ecuaciones elegantes

Clara Moskowitz

¿Qué ecuaciones son las más bellas a ojos de los físicos y los matemáticos?

SALUD PÚBLICA

Contaminación por arsénico

Katy Daigle

El agua contaminada con arsénico afecta a millones de personas en la India, Argentina y otros países. Los científicos intentan encontrar fuentes más seguras.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann,
Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes, Ideas que cambian el mundo y De la química a la astrofísica moderna*; Andrés Martínez: *Apuntes, Invasoras del norte y Animales que renuncian a la reproducción*; Óscar Hernández Sendín: *Ideas que cambian el mundo*; Javier Grande: *Exoplanetas: los próximos 20 años*; Carlos Lorenzo: *El gen de la obesidad y ¿Qué causó la extinción de los dinosaurios*; Juan Pedro Adrados: *La guerra de los telescopios*; Xavier Roqué: *Fertilidad, embarazo y atención al parto durante la Edad Media*; Guzmán Sánchez: *La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes y Los riesgos de las mamografías*; José Manuel González Mañas: *La maquinaria celular de la inflamación*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Prensa Científica, S.A.